



UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

**INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE ENSAIO NAS
CARACTERÍSTICAS DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA
E HIDRÁULICA**

Daniel Assares Rodrigues

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios

Júri

Presidente: Prof. Doutor Válder da Guia Lúcio

Orientador: Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques

Co-Orientador: Prof. Doutor Vasco Nunes da Ponte Moreira Rato

Arguente: Prof.^a Doutora Paulina Faria Rodrigues

LISBOA

Julho 2010

AGRADECIMENTOS

“A vida é como uma montanha russa” e tal como na vida, também no exercício moroso e bastante laborioso em que consistiu esta dissertação houveram picos de motivação, empenho e orgulho e momentos menos bons com obstáculos só superáveis através de um forte espírito de entreajuda humana. A todas as pessoas que comigo colaboraram na elaboração desta dissertação e fizeram desta montanha russa uma viagem que irei sempre recordar com saudade e contentamento, os meus sinceros agradecimentos. Entre essas pessoas gostaria de destacar:

- O meu Orientador, o Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques que me transmitiu ensinamentos de quase todos os campos da Engenharia Civil desde o meu primeiro ano de faculdade até à conclusão deste meu percurso académico. Ao longo deste trabalho sempre se mostrou disponível, solidário e, claro, paciente quando a minha prestação não correspondia com as suas expectativas;
- O meu Co-Orientador, o Prof. Doutor Vasco Nunes da Ponte Moreira Rato que me acompanhou em todos os ensaios laboratoriais e partilhou comigo toda a sua experiência nessa área e, posteriormente, no tratamento e análise dos resultados. Pelo seu apoio e dedicação como meu Co-Orientador e pelas conversas descontraídas e sinceras que me deram moral para superar muitos entraves o meu sentido obrigado;
- Os meus colegas e amigos, actuais distintos engenheiros, Isabel Ferreira, Sandro Botas e Tiago Pereira que, estando na mesma embarcação que eu, sempre remaram num só sentido para assim conseguirmos atingir a meta que todos desejávamos. É certo que todos eles tornaram os dias passados no laboratório muito mais animados, obviamente dentro dos parâmetros de profissionalismo que essa tarefa exige;
- “*Last but not least*” a minha família pois eles são a verdadeira essência do meu ser, a razão que me faz adormecer e acordar com um sorriso estampado no rosto. Aos meus pais José Rodrigues e Isabel Rodrigues, ao meu irmão e à minha cunhada, Pedro Rodrigues e Joana Rodrigues, aos meus futuros sogros João Martins e Teresa Pereira e à minha alma gémea Filipa Carmo Martins os meus agradecimentos pelo apoio e carinho incondicional que me dão em todos os dias da minha vida, nos bons e nos maus momentos.

INFLUÊNCIA DOS MÉTODOS DE ENSAIO NAS CARACTERÍSTICAS DE ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E HIDRÁULICA

RESUMO

Os rebocos das edificações desempenham uma função essencial na protecção face aos agentes climáticos, impedindo o desenvolvimento de anomalias que põem em causa as condições de habitabilidade e salubridade. Os objectivos inerentes à aplicação de argamassas de revestimento mantiveram-se imutáveis ao longo da história mas os materiais e as técnicas construtivas sofreram alterações decorrentes do desenvolvimento na construção.

O revestimento das alvenarias antigas é, na sua maioria, constituído por argamassas de cal com características físicas e mecânicas que em muito diferem das apresentadas pelas argamassas actuais à base de cimento Portland. As normas existentes a nível mundial para o ensaio de argamassas de revestimento são múltiplas e baseiam-se em procedimentos bastante díspares. A maior parte destas normas possui especificações adequadas às características das argamassas de cimento Portland, baseando o processo de mistura e as condições de cura na hidratação do seu ligante hidráulico e os ensaios mecânicos nas elevadas resistências atingidas num curto espaço de tempo. Tais normas, totalmente optimizadas para as argamassas à base de ligantes hidráulicos, são obviamente desajustadas para argamassas de cal que endurecem por carbonatação e mais lentamente.

O presente estudo permitiu aferir a forma como a preparação das argamassas influencia as suas características físicas e mecânicas. Para tal foram preparados vários provetes, metade dos quais com argamassa de cal aérea e a outra metade com argamassa de cal hidráulica. Os processos de mistura utilizados basearam-se em duas normas distintas, a Norma Europeia EN 1015-2 e a Norma Americana ASTM C305 e a cura foi efectuada em diferentes ambientes com humidades relativas de 50%, 65% e 95%. Após o período estabelecido para o endurecimento das argamassas foram determinadas as resistências mecânicas, o comportamento face à água relativamente à absorção capilar e ao índice de secagem, a massa volúmica aparente e a porosidade aberta.

Palavras-chave: Argamassas de revestimento; Normas; Processo de mistura; Condições de cura; Argamassa de cal aérea; Argamassa de cal hidráulica.

INFLUENCE OF THE TEST METHODS IN THE CHARACTERISTICS OF AIR AND HYDRAULIC LIME MORTARS

ABSTRACT

The renders of buildings play a key role in the protection against weathering, preventing the development of anomalies which undermine the living and health conditions. The objectives of mortar coating remained unchanged throughout history but the materials and application techniques have changed with the construction development.

The covering of old masonry is usually composed of lime mortars with physical and mechanical characteristics which are much different from those given by current mortars based on Portland cement. Worldwide existing mortar standards are numerous and based on procedures rather disparate. Most of these standards have specifications suited for the characteristics of Portland cement mortars, with the mixing process and curing conditions favouring the hydration of the hydraulic binder and the mechanical tests based on the high resistances achieved in a short period of time. Such standards, fully optimized for mortars based on hydraulic binders, are obviously inadequate for lime mortars that harden slowly by carbonation.

The present study allowed the assessment of how the preparation of mortars influences their physical and mechanical characteristics. For this end, several samples were prepared, half of them with air lime mortar and the other half with hydraulic lime mortar. The mixing processes were based on two different standards, the European standard EN 1015-2 and the American Standard ASTM C305 and the curing took place in different environments with relative humidities of 50%, 65% and 95%. After the established period for the hardening of the mortars it were determined the mechanical strengths, the behaviour towards water like the capillary absorption and drying rate, the apparent density and the open porosity.

Keywords: Mortar coating; Standards; Mixing process; Curing conditions; Air lime mortar; Hydraulic lime mortar.

ÍNDICE DO TEXTO

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivos.....	1
1.3 Organização do texto.....	2
ANÁLISE DO CONHECIMENTO EXISTENTE.....	3
2. Princípios fundamentais na formulação e aplicação de argamassas em edifícios antigos.....	3
2.1 Considerações gerais.....	3
2.2 Postulados a equacionar.....	4
2.3 Especificidades e condicionalismos na conservação de alvenarias antigas.....	4
3. Métodos de ensaio utilizados na caracterização de argamassas de cal.....	12
3.1 Reflexão sobre as normas vigentes.....	12
3.2 Processo de mistura das argamassas.....	13
3.3 Condições de cura.....	16
4. Materiais constituintes das argamassas em estudo.....	20
4.1 Ligantes.....	20
4.1.1 Pedra calcária e ligantes que dela derivam.....	20
4.1.2 Cal.....	21
4.1.2.1 Cal aérea.....	22
4.1.2.2 Cal hidráulica.....	25
4.2 Agregados.....	27
4.3 Qualidade da água empregue e suas particularidades.....	28
4.3.1 Extinção da cal viva.....	29
4.3.2 Amassadura e presa das argamassas.....	29
4.3.2.1 Escolha da água mais adequada.....	30
4.3.2.2 Quantidade óptima de água.....	30
4.4 Argamassas de cal.....	31
DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	34
5. Metodologia da investigação e campanha de ensaios.....	34
5.1 Descrição das argamassas.....	34
5.2 Identificação das argamassas.....	34

5.3 Condições de cura estabelecidas.....	36
5.4 Ensaio realizados.....	36
5.4.1 Procedimentos de ensaio.....	37
5.4.1.1 Baridade.....	37
5.4.1.2 Realização das amassaduras e preparação dos provetes.....	41
5.4.1.3 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	48
5.4.1.4 Determinação da resistência à tracção por flexão e à compressão.....	49
5.4.1.5 Determinação da absorção de água por capilaridade.....	53
5.4.1.6 Determinação do índice de secagem.....	55
5.4.1.7 Determinação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta.....	58
5.5 Resultados obtidos.....	61
5.5.1 Baridade.....	62
5.5.2 Consistência por espalhamento.....	62
5.5.3 Módulo de elasticidade dinâmico.....	63
5.5.4 Resistências à tracção por flexão e à compressão.....	64
5.5.5 Absorção de água por capilaridade.....	65
5.5.6 Índice de secagem.....	67
5.5.7 Massa volúmica e porosidade aberta.....	69
6. Análise dos resultados.....	71
6.1 Caracterização das argamassas frescas.....	71
6.2 Resistências mecânicas.....	72
6.2.1 Módulo de elasticidade dinâmico.....	72
6.2.2 Resistências à tracção por flexão e à compressão.....	75
6.3 Comportamento face à água.....	79
6.3.1 Absorção de água por capilaridade.....	79
6.3.2 Índice de secagem.....	82
6.4 Massa volúmica aparente e porosidade aberta.....	84
7. Discussão.....	87
8. Conclusões gerais e sugestão de trabalhos futuros.....	90
8.1 Conclusões gerais.....	90
8.2 Sugestão de trabalhos futuros.....	94
9. Bibliografia.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Paredes pouco espessas de edifícios antigos.....	6
Fig. 2.2 – Parede comum em edifícios antigos.....	6
Fig. 4.1 – Pedras calcárias em função do seu teor de impurezas e ligantes que delas derivam.....	21
Fig. 4.2 – Ciclo da cal.....	23
Fig. 5.1 – Cal aérea hidratada em pó.....	38
Fig. 5.2 – Cal hidráulica.....	38
Fig. 5.3 – Areia de rio.....	38
Fig. 5.4 – Areia de areeiro.....	38
Fig. 5.5 – Colocação da chapa de vidro sobre o recipiente cheio de água.....	39
Fig. 5.6 – Determinação da massa m_1	39
Fig. 5.7 – Determinação da temperatura da água t_a	39
Fig. 5.8 – Recipiente de menor capacidade cheio de cal hidráulica e pronto a ser nivelado.....	41
Fig. 5.9 – Estrutura utilizada na determinação da baridade das areias.....	41
Fig. 5.10 – Processo de nivelamento da superfície superior do recipiente de maior capacidade.....	41
Fig. 5.11 – Misturador mecânico com duas velocidades.....	43
Fig. 5.12 – Preenchimento do molde com argamassa fresca.....	44
Fig. 5.13 – Compactação da 1ª camada de argamassa.....	44
Fig. 5.14 – Compactação da 2ª camada de argamassa.....	44
Fig. 5.15 – Nivelamento da superfície superior do molde.....	45
Fig. 5.16 – Rotação da manivela da mesa provocando 15 pancadas, uma por segundo.....	45
Fig. 5.17 – Medição dos 4 afastamentos após o espalhamento.....	45
Fig. 5.18 – Compactador mecânico para provetes.....	46
Fig. 5.19 – Enchimento do molde em 2 camadas.....	46
Fig. 5.20 – Nivelamento da superfície superior do molde.....	46
Fig. 5.21 – Molde com 3 provetes prismáticos, devidamente rasado e pronto para ser acondicionado no respectivo ambiente de cura.....	46

Fig. 5.22 – Compartimento com ambiente de cura de 20°C de temperatura e 65% HR.....	47
Fig. 5.23 - Compartimento com ambiente de cura de 20°C de temperatura e 65% HR.....	47
Fig. 5.24 – Câmara climática com ambiente de cura de 20°C de temperatura e 50% HR.....	47
Fig. 5.25 - Câmara climática com ambiente de cura de 20°C de temperatura e 50% HR.....	47
Fig. 5.26 - Câmara climática com ambiente de cura de 20°C de temperatura e 95% HR.....	47
Fig. 5.27 - Câmara climática com ambiente de cura de 20°C de temperatura e 95% HR.....	47
Fig. 5.28 – Equipamento utilizado para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	49
Fig. 5.29 – Provete colocado no suporte do equipamento. Nas suas extremidades estão dispostas a fonte emissora de vibrações e a unidade de recepção.....	49
Fig. 5.30 – Máquina universal de tracção.....	51
Fig. 5.31 – Provete colocado sobre o suporte para ensaios de flexão.....	51
Fig. 5.32 – Meio prisma colocado no suporte para ensaios de compressão.....	52
Fig. 5.33 – Aspecto do provete após atingir a rotura por compressão.....	52
Fig. 5.34 – 3 amostras resultantes de cada meio prisma ensaiado.....	53
Fig. 5.35 – Provetes colocados sobre o tabuleiro metálico, com a sua base em contacto com a lâmina de água com 2 mm de espessura.....	55
Fig. 5.36 – Determinação da massa de um provete numa balança com precisão de 0,001g após período de tempo estabelecido.....	55
Fig. 5.37 – Disposição da estrutura de ensaio entre cada período de pesagens.....	55
Fig. 5.38 – Aspecto dos provetes logo após a sua imersão em água.....	58
Fig. 5.39 – Aspecto dos provetes 17 dias após a sua imersão em água.....	58
Fig. 5.40 – Caixas onde se acondicionaram os provetes ao longo do processo de evaporação.....	58
Fig. 5.41 – Operação de imersão dos provetes com recurso a um funil de vidro imerso num recipiente cheio de água e ligado ao exsicador através de um tubo	

flexível.....	60
Fig. 5.42 - Exsicador contendo os provetes imersos em água à pressão de 2667 Pa.....	60
Fig. 5.43 - Provetes imersos em água à pressão atmosférica.....	61
Fig. 5.44 - Esquema de ensaio para a pesagem hidrostática.....	61
Fig. 5.45 - Pesagem do provete em imersão (pesagem hidrostática).....	61
Fig. 5.46 - Operação para remover o excesso de água depositada nas superfícies expostas do provete.....	61
Fig. 5.47 - Determinação da massa do provete saturado.....	61
Fig. 5.48 - Absorção capilar das argamassas de cal aérea.....	66
Fig. 5.49 - Absorção capilar das argamassas de cal hidráulica.....	67
Fig. 5.50 - Variação do teor de água em função do tempo nas argamassas de cal aérea.....	68
Fig. 5.51 - Variação do teor de água em função do tempo nas argamassas de cal hidráulica.....	69
Fig. 6.1 - Módulo de elasticidade dinâmico.....	72
Fig. 6.2 - Influência do processo de mistura relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico.....	73
Fig. 6.3 - Influência das condições de cura relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico.....	74
Fig. 6.4 - Resistência à tracção por flexão.....	75
Fig. 6.5 - Resistência à compressão.....	76
Fig. 6.6 - Influência do processo de mistura relativamente à resistência à tracção.....	77
Fig. 6.7 - Influência do processo de mistura relativamente à resistência à compressão.....	77
Fig. 6.8 - Influência das condições de cura relativamente à resistência à tracção.....	78
Fig. 6.9 - Influência das condições de cura relativamente à resistência à compressão.....	78
Fig. 6.10 - Absorção capilar.....	79
Fig. 6.11 - Influência do processo de mistura relativamente à absorção de água por capilaridade.....	80
Fig. 6.12 - Influência das condições de cura relativamente à absorção de água por capilaridade.....	81

Fig. 6.13 - Influência do processo de mistura relativamente ao índice de secagem	82
Fig. 6.14 - Influência das condições de cura relativamente ao índice de secagem.	83
Fig. 6.15 - Compacidade das argamassas em estudo.....	84
Fig. 6.16 - Influência do processo de mistura relativamente à compacidade.....	85
Fig. 6.17 - Influência das condições de cura relativamente à compacidade.....	86

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Processo de mistura das argamassas.....	14
Quadro 3.2 – Velocidades da pá misturadora.....	14
Quadro 3.3 – Condições de cura das argamassas.....	18
Quadro 4.1 – Grau de hidraulicidade das cais hidráulicas naturais.....	26
Quadro 5.1 – Codificação das argamassas.....	35
Quadro 5.2 – Massa volúmica da água em relação à sua temperatura.....	39
Quadro 5.3 – Baridade das matérias-primas.....	62
Quadro 5.4 – Consistência por espalhamento, relações água/ligante e quantidades empregues na mistura.....	63
Quadro 5.5 – Módulo de elasticidade dinâmico (E).....	64
Quadro 5.6 – Resistências à tracção e à compressão.....	65
Quadro 5.7 – Coeficiente de capilaridade e valor assintótico.....	66
Quadro 5.8 – Quantidade máxima de água absorvida, capacidade de absorção de água e índice de secagem.....	68
Quadro 5.9 – Massa volúmica aparente e porosidade aberta.....	70
Quadro 7.1 – Análise comparativa das características em estudo.....	88

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A utilização de argamassas no revestimento de edifícios constitui um processo de extrema importância, tendo como função essencial assegurar a preservação e a estanquidade das construções. A protecção desempenhada pelo reboco assume maior preponderância nas paredes de edifícios antigos, constituídas por materiais mais permeáveis e higroscópicos que os utilizados nas construções mais recentes. As edificações antigas possuem, de um modo geral, revestimentos exteriores à base de argamassas de cal, pelo facto de apresentarem melhor compatibilidade com o suporte e corresponderem ao que era usado na sua fase de construção. As intervenções de conservação desses revestimentos devem basear-se na aplicação de argamassas de substituição que sejam duráveis e que preservem a integridade física do suporte e os seus valores históricos e culturais.

As normas existentes para o ensaio de argamassas, sejam elas à base de cal ou de cimento Portland, são múltiplas e baseiam-se em diferentes procedimentos. A variedade de métodos de ensaio utilizados para atingir o mesmo fim torna impossível a comparação quantitativa dos resultados decorrentes de estudos efectuados em diferentes locais e laboratórios. Algumas normas apresentam procedimentos ajustados para argamassas de ligantes hidráulicos mas totalmente em discordância com as necessidades das argamassas à base de ligantes aéreos.

1.2 Objectivos

O presente estudo propôs-se a comparar dois processos de mistura distintos baseados nas Normas EN 1015-2:1998/A1:2006 [20] e ASTM C305 [3] e dois métodos de cura igualmente díspares, preconizados pelas Normas EN 1015-11:1999/A1:2006 [27] e ASTM C 109/C 109M [2]. Com a análise efectuada pretende-se aferir as diferenças existentes em Normas cujos objectivos são os mesmos e avaliar em que extensão essas divergências influenciam as características das argamassas ensaiadas. O trabalho experimental incidiu no ensaio das características físicas e mecânicas e na avaliação do comportamento face à água de argamassas de cal aérea e hidráulica. Como forma de estimar a influência que a amassadura praticada e a humidade relativa imposta

no período de cura iria ter nas características ensaiadas, metade dos provetes foi preparada segundo a Norma EN 1015-2 e a outra metade de acordo com a Norma ASTM C305 e, posteriormente, os provetes foram acondicionados em 3 ambientes de cura com temperatura constante de 20 °C e humidades relativas de 50%, 65% e 95%. A variação da humidade relativa no período de cura possui especial interesse visto que o endurecimento das argamassas de cal hidráulica processa-se através de uma fase aérea e de uma fase hidráulica, enquanto que as argamassas de cal aérea ganham presa exclusivamente por carbonatação. Em função desta diferença é expectável que as argamassas assumam diferentes características relativamente à humidade na cura.

1.3 Organização do texto

A presente dissertação é constituída por 9 capítulos e divide-se em duas partes, a análise do conhecimento existente e o desenvolvimento experimental.

O capítulo 1 corresponde à introdução, onde se pretende contextualizar o trabalho desenvolvido, expor os objectivos gerais e retratar a organização do texto.

A primeira parte do texto é composta pela análise do conhecimento existente, englobando os capítulos 2, 3 e 4. No capítulo 2 são evidenciados os princípios orientadores de intervenções de conservação que envolvam argamassas de reboco de alvenarias antigas. O capítulo 3 expõe uma análise comparativa entre as normas de ensaio em estudo, no que diz respeito ao processo de mistura e ao método de cura das argamassas. O estudo das características intrínsecas de cada constituinte das argamassas analisadas aparece detalhado no capítulo 4.

A segunda parte do texto retrata o desenvolvimento experimental e é constituída pelos capítulos 5, 6 e 7. O capítulo 5 descreve detalhadamente todos os procedimentos efectuados ao longo da campanha de ensaios e, posteriormente, revela os resultados obtidos. Nos capítulos 6 e 7 analisam-se os resultados obtidos de acordo com as variáveis estipuladas, o procedimento de mistura, o método de cura e o ligante utilizado.

O capítulo 8 apresenta as conclusões obtidas após o desenvolvimento experimental e o capítulo 9 expõe todas as referências bibliográficas que serviram de base de trabalho para esta dissertação.

ANÁLISE DO CONHECIMENTO EXISTENTE

2. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS NA FORMULAÇÃO E APLICAÇÃO DE ARGAMASSAS EM EDIFÍCIOS ANTIGOS

2.1 Considerações gerais

As argamassas ensaiadas neste estudo de investigação foram inicialmente formuladas com o objectivo de incorporarem uma categoria muito específica no vasto universo dos materiais de construção. São argamassas à base de cal aérea e hidráulica, usualmente designadas por *argamassas tradicionais* devido à sua aplicabilidade na protecção de alvenarias de edifícios antigos. Devido à sua formulação em termos de escolha dos ligantes e agregados e dos seus respectivos traços volumétricos são utilizadas como reboco exterior, protegendo as alvenarias das acções nefastas dos agentes climáticos. As argamassas em causa são utilizadas tendo em mente “*critérios diferentes dos aplicáveis em edifícios correntes, designadamente no que se refere às questões de compatibilidade com os materiais existentes, reversibilidade e durabilidade*” [42].

Nos edifícios antigos desprovidos de qualquer valor histórico e cultural a preocupação nas intervenções de conservação deve recair apenas na utilização de argamassas compatíveis com as alvenarias em causa, de forma a otimizar as condições de habitabilidade e durabilidade da construção. Num patamar superior de relevância estão os edifícios que adquiriram importância para a sociedade em que estão inseridos devido à estreita ligação com a sua evolução e desenvolvimento. Desta última classe faz parte todo o património histórico edificado. A conservação dos rebocos exteriores das alvenarias destas edificações deve ser, segundo Henriques, uma “*actividade cultural com implicações técnicas*” [42]. Os princípios orientadores destas intervenções devem assentar nos pressupostos enunciados no único instrumento susceptível de aplicação em operações desta especificidade na sociedade ocidental, a Carta de Veneza de 1964.

Apesar do valor intrínseco de cada edificação ser bastante variável, este estudo visa expor as especificidades e os condicionalismos destas operações, bem como a sua

índole ética e moral, de forma a ser mais um incentivo à erradicação de atitudes incorrectas face aos problemas que a conservação destas alvenarias antigas acarreta. Tendo presente qual a abordagem mais adequada à luz do que é a teoria actual vigente na conservação, os responsáveis devem ajustar os seus conhecimentos às singularidades dos seus projectos.

2.2 Postulados a equacionar

As intervenções efectuadas em edifícios antigos com valor histórico, apesar das suas especificidades, devem ser orientadas segundo os mesmos princípios essenciais da conservação. As premissas que servem de base a estas intervenções derivam dos 16 artigos constituintes da Carta de Veneza e são as seguintes: o princípio da intervenção mínima, o carácter singular de cada edificação, a preservação incondicional da autenticidade do edifício nas suas diversas vertentes, a utilização de técnicas e materiais tradicionais, a salvaguarda de uma futura reversibilidade, a conservação do maior número de elementos originais, a redução de acções negligentes, o carácter multidisciplinar das intervenções, a subjugação das implicações técnicas perante a problemática cultural e a publicação dos detalhes relevantes em cada acção [43].

2.3 Especificidades e condicionalismos na conservação de alvenarias antigas

A conservação das alvenarias antigas suscita um vasto espectro de dificuldades que em muito diferem das equacionadas nos edifícios contemporâneos que, sendo constituídos por uma estrutura de betão armado e paredes em alvenaria de tijolo, apresentam comportamentos díspares dos edifícios antigos. Uma das questões que gera inúmeras acções nefastas é o facto da maioria dos técnicos ligados à construção estarem, desde a segunda metade do século XX, habituados a lidar com a construção moderna, baseada em materiais com uma história recente e com propriedades mecânicas, físicas e químicas diferentes das apresentadas pelos materiais tradicionais. Apesar destes materiais modernos assegurarem comportamentos óptimos na óptica da construção actual, não é desejável que se estabeleça uma correlação com os desempenhos destes materiais quando aplicados em alvenarias antigas. O progressivo desprezo pelos materiais e tecnologias tradicionais desde o aparecimento do cimento Portland favoreceu, em larga escala, a falta de conhecimentos e sensibilidade em relação à

conservação das edificações antigas. Embora as argamassas de cal tenham demonstrado ao longo de vários séculos possuir propriedades compatíveis com as alvenarias antigas, a sua substituição por argamassas de cimento Portland tem sido prática corrente, devido à noção de que estas são mais duráveis e resistentes [52].

Para compreender de forma mais clara o comportamento das alvenarias antigas torna-se necessário conhecer os seus materiais constituintes e as suas características intrínsecas.

As paredes exteriores dos edifícios antigos, além da sua função de protecção em relação às condições climáticas têm também funções estruturais pois estes elementos são responsáveis por suportar as cargas verticais e encaminhá-las para as fundações. A sua espessura tem de ser obrigatoriamente superior à verificada nas paredes modernas. A dimensão da secção transversal destas paredes é proporcional ao valor das cargas actuates.

As paredes com 40 a 60 centímetros de espessura são consideradas como pouco espessas. Dentro desta categoria existem três tipos de parede, a parede com 40 cm, caracterizada por possuir apenas uma fiada de pedra aparelhada, a parede com 50 cm, com duas fiadas de pedra aparelhada e a parede com 60 cm, cuja secção transversal é composta por duas fiadas de pedra aparelhada nas extremidades e um enchimento em pedra miúda no centro (ver fig. 2.1). Porém, as paredes mais usuais nos edifícios antigos têm espessuras iguais ou superiores a um metro e caracterizam-se pela existência de dois paramentos de pedra, com cerca de 20 cm cada, e um enchimento na parte central à base de terra, pedra miúda e cal (ver fig. 2.2).

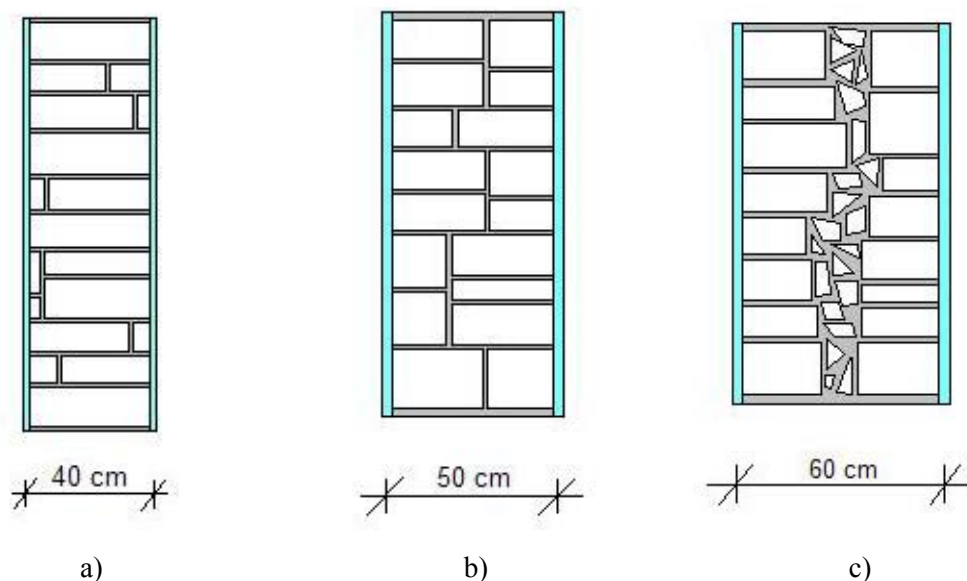


Fig. 2.1 – Paredes pouco espessas de edificios antigos: a) uma fiada de pedra aparelhada; b) duas fiadas de pedra aparelhada; c) duas fiadas de pedra aparelhada com enchimento central

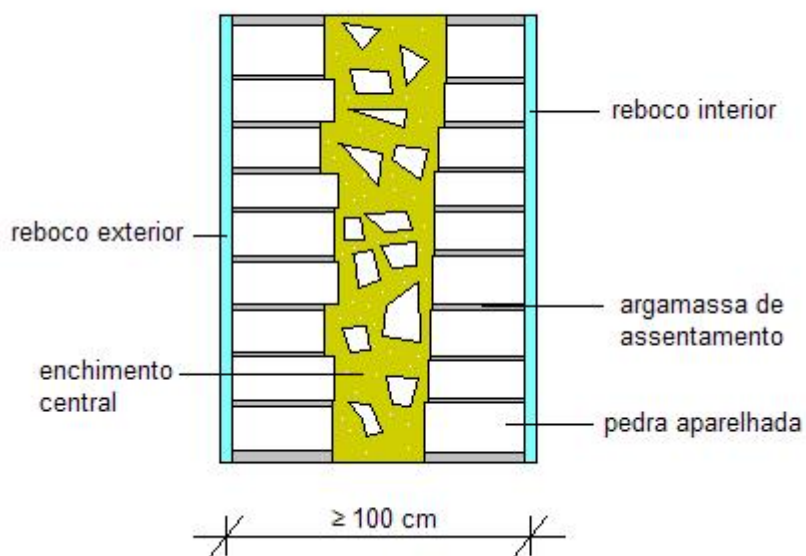


Fig. 2.2 – Parede comum em edificios antigos

Os materiais que compõem estas alvenarias têm características muito próprias. São dotados de valores de capacidade resistente e módulo de elasticidade significativamente inferiores em relação aos materiais modernos, sendo que a resistência à tracção é desprezável. Quanto à possível absorção de água, estes materiais

demonstram alguma vulnerabilidade, já que são relativamente porosos e higroscópicos [52].

As argamassas são parte integrante destas alvenarias, assumindo as mais variadas funções. São utilizadas como aglomerantes dos blocos de pedra e tijolo em alvenarias irregulares ou como argamassa de assentamento em alvenarias regulares, como reboco exterior e interior tendo, simultaneamente, capacidade decorativa e de protecção, como suporte de pinturas murais, os designados *frescos*, ou ainda, como argamassa de colagem de azulejos [13].

De acordo com as suas funções as argamassas podem-se agrupar em duas categorias, as utilizadas com o propósito de proteger as alvenarias em relação aos agentes climáticos ou ambientais (rebocos exteriores e interiores) e aquelas cuja principal missão é contribuir para a estabilidade estrutural das paredes (argamassas de assentamento e de refechamento de juntas). Da primeira categoria, as argamassas utilizadas como rebocos exteriores estão sujeitas a condições mais severas do que no caso dos rebocos interiores devido à sua exposição directa aos agentes climáticos como a chuva e o vento e às inúmeras acções mecânicas a que estão submetidas diariamente. Na formulação e aplicação destas argamassas é necessário assegurar a sua compatibilidade com o ambiente em que irão estar inseridas para que possam resistir a adversidades tão distintas como a água, na forma líquida ou de vapor, os sais solúveis e as tensões mecânicas resultantes da sua ligação com o suporte. A interacção das argamassas com o suporte proporciona um dilema de difícil solução quanto às suas exigências funcionais. Se por um lado a sua função é proteger as alvenarias sobre as quais estão aplicadas por outro, devem possuir características que previnam ou minimizem a sua degradação. Estas duas equações não são fáceis de satisfazer por completo e em simultâneo e apenas o equilíbrio entre ambas resulta na situação mais desejável, tendo sempre presente que o principal objectivo das argamassas do reboco exterior, mais concretamente as de substituição, é conservar os materiais históricos com que contactam [40].

As características que as argamassas devem possuir para proteger eficazmente as alvenarias em que estão aplicadas são as seguintes [40; 52]:

- A absorção de água por capilaridade deve ser a mínima possível. Para que tal seja viável, as argamassas devem ter valores muito reduzidos de coeficiente de

capilaridade e valor assintótico. O coeficiente de capilaridade indica qual a velocidade de absorção nos instantes iniciais após o contacto com a água, enquanto que o valor assintótico diz respeito à quantidade total de água absorvida;

- As argamassas devem ser bastante permeáveis ao vapor de água para possibilitar que a água que inevitavelmente acede à sua estrutura interna, ou mesmo à alvenaria, possa ser expulsa para o ambiente exterior. A experiência demonstra que os rebocos exteriores, quando aplicados por camadas com areia de diferentes granulometrias, para que a porosidade seja decrescente do interior para o exterior, dificultam o acesso das águas pluviais e facilitam a secagem da parede. Além das águas da chuva, as paredes têm ainda de conseguir atenuar os problemas decorrentes da subida do nível freático e da consequente absorção de água por capilaridade através das fundações. Se o reboco exterior não for suficientemente permeável ao vapor de água, permitindo a secagem das paredes, a água existente na sua estrutura interna pode originar esforços mecânicos decorrentes dos ciclos de gelo-degelo ou da cristalização dos sais em solução. A secagem das paredes pode efectivar-se através do reboco interior quando este for significativamente mais permeável ao vapor de água que o reboco exterior. Este processo não é de todo aceitável pois propicia a formação de criptoflorescências ou eflorescências, ou seja, depósitos de sais no interior da parede ou à sua superfície, respectivamente, podendo deteriorar *frescos* de enorme valor histórico. O vapor de água que acede aos compartimentos do edifício torna favorável o aparecimento de condensações superficiais e o desenvolvimento de bolores e outros tipos de fungos que põem em causa a própria habitabilidade dessas divisões. Embora a permeabilidade dos rebocos exteriores ao vapor de água seja essencial para a protecção das alvenarias, como foi evidenciado anteriormente, a secagem muito rápida das paredes pode aumentar a probabilidade do aparecimento de criptoflorescências, visto que os sais podem cristalizar nos poros da argamassa ou na interface entre a argamassa e o suporte, gerando a deterioração do reboco ou a perda de aderência ao suporte;

- Em termos de resistência mecânica, as argamassas a utilizar devem ser menos resistentes e mais deformáveis (menor valor de módulo de elasticidade) do que os restantes constituintes da parede, de forma a assumirem a função de juntas de dilatação, absorvendo as tensões que derivam das variações dimensionais da alvenaria. Quando o reboco exterior é constituído por duas ou mais camadas, procedimento típico sempre que a sua espessura é superior a 10 mm, as propriedades mecânicas devem decrescer do interior para o exterior;

- A estabilidade dimensional é uma característica essencial para que não se verifique a ocorrência de fissuras no reboco logo após a sua aplicação, ainda na fase de cura, comprometendo assim a sua relativa impermeabilidade às águas da chuva. A longo prazo, as dilatações e contracções das argamassas devem ser reduzidas e semelhantes às da alvenaria, para que não se desenvolvam tensões internas na parede passíveis de destruir o próprio material ou de comprometer a aderência entre o revestimento e o suporte;

- A capacidade de aderência ao suporte por parte das argamassas de revestimento é de extrema importância para a protecção da alvenaria visto que, se esta ligação não for efectiva durante um largo período de tempo após a aplicação do reboco, algumas zonas do suporte vão ficar desprovidas da sua única protecção em relação aos agentes climáticos até que se efectue uma nova intervenção para repor as partes de revestimento em falta. Porém, as argamassas para possuírem uma boa capacidade de aderência, por norma, têm também resistências mecânicas elevadas. É notória a dificuldade subjacente que este facto impõe dado que é necessário atingir um equilíbrio estável entre estas duas características da argamassa, tendo como objectivo principal a protecção mais adequada da alvenaria a que se destina;

- Devido à inevitável entrada de água no interior das paredes e à posterior evaporação através dos seus materiais constituintes, é de extrema importância que as argamassas incorporem o mínimo de sais solúveis possível, para evitar o desenvolvimento de compostos expansivos que possam gerar tensões na estrutura interna das argamassas ou, ainda mais gravoso, nos poros das pedras da alvenaria.

As características necessárias para prevenir a degradação precoce das argamassas, aumentando assim a sua durabilidade são, em alguns casos, contrárias às mencionadas para a protecção eficaz das alvenarias antigas em que são aplicadas. Para satisfazer este propósito na sua plenitude as argamassas devem assumir as seguintes particularidades [40]:

- As alvenarias antigas possuem na sua constituição sais solúveis susceptíveis de danificar as argamassas, seja por via química, caso específico dos sulfatos que quando interagem com os aluminatos e silicatos presentes nas argamassas dão origem à formação de cristais expansivos como a etringite e a taumasite ou por via mecânica no caso dos cloretos. Desta constatação podem ser retiradas duas ilações contraditórias, as argamassas devem ter um baixo teor de silicatos e aluminatos de cálcio, característica

inerente de argamassas com baixas resistências mecânicas mas, em oposição, essas mesmas resistências devem ser elevadas para que as tensões internas geradas pela cristalização dos sais possam ser absorvidas sem o consequente dano do material. O diâmetro dos poros internos da argamassa deve ser suficientemente elevado para permitir a cristalização dos sais sem que haja desenvolvimento de tensões;

- Os ciclos de gelo-degelo são mais um dos factores de degradação das argamassas devido ao aumento de volume em cerca de 9% quando se dá a transição da água do estado líquido para o sólido. Se os poros das argamassas estiverem completamente colmatados com água, a sua estrutura interna não irá resistir às tensões geradas. Para fazer face a este problema, os rebocos devem absorver o mínimo de água possível e possuírem elevada capacidade resistente;

- A evaporação da água existente no reboco para o ambiente exterior é um aspecto crucial, tendo em conta os danos que esta pode gerar quando se deposita nos poros da argamassa, em termos dos ciclos gelo-degelo e cristalização-dissolução dos sais;

- Por último, a capacidade resistente dos rebocos exteriores deve ser elevada para que as consequências de acções mecânicas sejam mínimas. A argamassa deve atingir a sua resistência máxima num curto período de tempo após a sua aplicação para prevenir que nessa fase inicial qualquer acção possa deteriorá-la de forma permanente.

Como foi referido, as argamassas formuladas com o propósito de serem aplicadas como reboco exterior devem possuir particularidades específicas de acordo com o objectivo pretendido. As características óptimas para assegurar a preservação das argamassas nem sempre coincidem com as necessárias à protecção e conservação das alvenarias antigas nas quais estão aplicadas. Deve ser atingido um equilíbrio entre estes dois fins, tendo sempre em mente que o objectivo crucial de qualquer intervenção de conservação é preservar a integridade das alvenarias e os valores históricos e culturais que elas encerram. Daí o verdadeiro significado da designação atribuída ao reboco exterior, *camada de sacrificio*, na medida em que o seu desígnio último é proteger o suporte perante as adversidades e inevitavelmente sucumbir com o passar do tempo.

Os rebocos exteriores são ainda responsáveis pela estética do edifício e por esta razão, qualquer tinta ou caiação que seja aplicada terá de ser compatível com a argamassa existente. A intervenção a efectuar deve adoptar a seguinte lógica, a compatibilidade deve ser ajustada do interior para o exterior da parede, isto é, as

argamassas do reboco exterior têm de se adequar à alvenaria existente do edifício e qualquer acabamento a ser aplicado posteriormente deve harmonizar-se com o conjunto [39].

3. MÉTODOS DE ENSAIO UTILIZADOS NA CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CAL

3.1 Reflexão sobre as normas vigentes

Na situação actual, a comunidade científica investiga as características das argamassas de cal segundo diferentes métodos de ensaio, consoante a sua localização geográfica e as tradições locais. A diversidade de procedimentos torna impossível a comparação quantitativa entre os resultados decorrentes dos diferentes estudos desenvolvidos. Mesmo no caso de investigações baseadas em especificações idênticas, o simples facto de se realizarem em diferentes laboratórios pode influenciar as propriedades das argamassas de forma significativa. Factores como as condições ambientais do laboratório, distrações do operador, alterações na velocidade ou no formato da pá do misturador e tempos de amassadura desajustados alteram a estrutura da pasta [66].

Além da pluralidade de normas empregues para atingir o mesmo fim, verificam-se, em algumas delas, procedimentos totalmente desadequados às especificidades das argamassas de cal.

A consciencialização da importância de estabelecer normas para os materiais de construção coincidiu com a descoberta do processo de produção do cimento Portland no século XIX. As potencialidades deste novo material e as vantagens da sua incorporação nas argamassas em detrimento das usuais cais, aéreas ou hidráulicas, potenciou o desenvolvimento das normas emergentes de acordo com a sua composição química e com os seus requisitos em termos de preparação e cura. A adaptação efectuada dos métodos de ensaio em relação às argamassas à base de cimento Portland é ainda evidente nas normas actuais. É óbvio que os processos de mistura bem como as condições de cura e o período que antecede qualquer tipo de ensaio, não podem ser idênticos para as argamassas de cimento e para as argamassas de cal [8].

A necessidade de conservação dos edifícios antigos e a recente consciencialização das desvantagens decorrentes da utilização de argamassas com algum teor de cimento nestas intervenções despoletou na comunidade científica o desejo de adequar as normas vigentes aos requisitos das argamassas de cal.

Duas acções com enormes benefícios para as intervenções de conservação e para a investigação das argamassas de cal seriam a uniformização das normas que especificam o método de preparação e cura das argamassas e os ensaios necessários à sua caracterização e a adequação das mesmas às especificidades do ligante aéreo que constitui este material.

3.2 Processo de mistura das argamassas

O presente estudo foi desenvolvido com a finalidade de explorar as particularidades de duas normas relativas ao processo de mistura de argamassas e aferir as suas implicações nas características físicas e mecânicas do material endurecido. As normas utilizadas na investigação foram, a Norma Europeia EN 1015-2:1998/A1:2006 [20] e a Norma ASTM C305 [3] elaborada nos Estados Unidos da América. As especificações de ambas as normas são bastante díspares e apresentam-se no quadro 3.1. As velocidades do misturador utilizado na amassadura estão indicadas no quadro 3.2.

Quadro 3.1 – Processo de mistura das argamassas

EN 1015-2	ASTM C305
<p>1 - Coloca-se a pá e a cuba secas no misturador;</p> <p>2 - introduz-se toda a quantidade de água na cuba;</p> <p>3 - junta-se a componente sólida da mistura, ligante e areia, ao longo de um período de 30 s, com o misturador na velocidade lenta;</p> <p>4 - termina-se misturando à mesma velocidade (lenta) durante mais 60 s.</p>	<p>1 - Coloca-se a pá e a cuba secas no misturador;</p> <p>2 - introduz-se toda a quantidade de água na cuba;</p> <p>3 - junta-se o ligante à água e, de seguida, liga-se o misturador na velocidade lenta e mistura-se durante 30 s;</p> <p>4 - junta-se, lentamente, toda a quantidade de areia ao longo de um período de 30 s, enquanto se mistura na velocidade lenta;</p> <p>5 - pára-se o misturador, muda-se para a velocidade rápida e mistura-se durante 30 s;</p> <p>6 - pára-se o misturador e deixa-se a argamassa repousar durante 90 s. Durante os primeiros 15 s deste intervalo raspa-se rapidamente para a amassadura alguma argamassa que possa estar depositada nas paredes da cuba. No restante tempo deste intervalo a cuba deverá estar tapada;</p> <p>7 - termina-se, misturando na velocidade rápida durante 60 s.</p>

Quadro 3.2 – Velocidades da pá misturadora

Velocidades	Rotação axial [r/min]	Movimento planetário [r/min]
Lenta	140 ± 5	62 ± 5
Rápida	285 ± 10	125 ± 10

Da comparação entre os dois processos de mistura descritos resultam as seguintes constatações:

EN 1015-2	ASTM C305
<ul style="list-style-type: none"> - Tempo de mistura de apenas 90 s; - toda a mistura é realizada na velocidade lenta; - durante todo o processo a mistura efectua-se com a totalidade da componente sólida, ligante e agregado; - o processo é contínuo, sem qualquer tipo de pausa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tempo de mistura superior, registando um total de 150 s; - o maior período da mistura, 90 s, é realizado na velocidade rápida; - antes de se ligar o misturador o ligante é adicionado à água e, posteriormente, esta pasta é misturada durante 30 s sem a adição de qualquer agregado; - antecedendo o último período de mistura, a argamassa repousa durante 90 s, sendo que nos últimos 75 s deste intervalo a cuba permanece tapada.

A análise bibliográfica dos estudos já desenvolvidos permite estabelecer um consenso geral relativamente ao processo mais adequado de misturar argamassas de cal aérea. A École D'Avignon na sua publicação “Techniques et Pratique de la Chaux” [14] preconiza uma mistura em velocidade lenta ao longo de um período de 3 a 5 minutos. Além disso, refere que é preferível efectuar uma mistura inicial entre a cal e a água e, posteriormente, adicionar o agregado. Apenas no trabalho em obra, a mistura da componente sólida (ligante e agregado) antes da adição da água é aceitável. Charola et al [8] afirma que as normas deveriam definir o tipo de misturadores mais adequados às argamassas de cal e prolongar os períodos de mistura em relação aos praticados para argamassas à base de cimento. Dando como exemplo a Norma Britânica BS 4551:1980, com um tempo de mistura total de 3 minutos, refere que este período é ajustado para argamassas de cimento mas insuficiente para o caso da cal. Esta opinião é corroborada por Faria et al [34] ao afirmar que, “*Executou-se uma amassadura rápida, mais adequada para argamassas com ligantes hidráulicos, logo menos vantajosa para argamassas envolvendo ligantes aéreos (que adquirem melhores características quando resultantes de amassaduras mais prolongadas)*”.

O repouso entre períodos de mistura especificado em algumas normas é benéfico para argamassas à base de ligantes hidráulicos pois, possibilita que a reacção de hidratação dos seus componentes se inicie [41].

Segundo os autores enunciados, nenhuma das normas em estudo preconiza um procedimento totalmente adequado às particularidades das argamassas de cal aérea. Na norma EN 1015-2, apesar de a mistura se processar sempre em velocidade lenta, como é desejável, o intervalo de 90 s imposto para completar o procedimento é bastante reduzido. No trabalho experimental foram evidentes as dificuldades em juntar toda a componente sólida nos escassos 30 s indicados pela norma.

Relativamente à norma ASTM C305, o período de mistura é mais prolongado mas ainda insuficiente para argamassas de cal aérea. Todo o procedimento é mais vocacionado para argamassas à base de ligantes hidráulicos. O maior período da amassadura é realizado em velocidade rápida, o ligante é adicionado à água e misturado durante 30 s antes de se juntar o agregado e o período de repouso potencia a hidratação inicial dos componentes hidráulicos do ligante, com a preocupação acrescida de se tapar a cuba neste período para não se registarem perdas de água para o ambiente.

3.3 Condições de cura

As condições ambientais definidas para o período de cura, como a humidade relativa e a temperatura, são cruciais para potenciar o endurecimento das argamassas, por carbonatação do hidróxido de cálcio no caso de ligantes aéreos e pela hidratação dos componentes hidráulicos nas cals hidráulicas e cimentos.

Relativamente a argamassas à base de ligantes hidráulicos, Charola et al [8] assume que o período de cura deverá realizar-se em ambientes com elevada humidade relativa, proporcionando a contínua hidratação dos componentes hidráulicos e o subsequente desenvolvimento dos cristais resultantes. Para o caso de argamassas de cal aérea, refere que são preferíveis ambientes mais secos, com cerca de 50% de humidade relativa. Esta teoria baseia-se no facto de, apesar da presença de água ser essencial para o processo de carbonatação e para a cristalização das partículas de calcite resultantes, o excesso de humidade propicia o aparecimento de uma fina camada de água que envolve as argamassas e dificulta a difusão do dióxido de carbono, retardando a sua interacção

com o hidróxido de cálcio. Porém, existem estudos que contestam, em certa medida, esta hipótese.

Em argamassas de cal aérea sujeitas a ambientes com 100% de dióxido de carbono e humidade relativa variável entre 25 e 95%, foi detectado um aumento do grau de carbonatação com o aumento da humidade relativa. Registou-se ainda que, em ambientes muito secos ou completamente saturados, o grau de carbonatação foi mínimo. Em termos de temperatura, a velocidade óptima para a reacção de carbonatação foi detectada com 20 °C. Para temperaturas mais elevadas, as reacções químicas tendem a processar-se com maior celeridade mas a solubilidade do dióxido de carbono e do hidróxido de cálcio diminui [15]. El-Turki et al [16] monitorizou o desenvolvimento da carbonatação em argamassas hidráulicas NHL3.5 expostas a um ambiente de cura com 100% de dióxido de carbono e humidades relativas de 65 e 97%. Após um período de apenas 5 dias de cura, verificou-se que o grau de carbonatação das argamassas sujeitas à humidade relativa de 97% era sensivelmente o dobro do registado para o caso das argamassas em ambiente mais seco. A investigação concluiu que ambientes muito húmidos e com altas concentrações de dióxido de carbono favorecem a carbonatação. Foi ainda detectada a formação de uma camada de partículas de calcite na superfície das argamassas, dificultando a difusão do dióxido de carbono e da humidade e logo, retardando o processo de endurecimento.

No decurso da presente investigação foram comparados os métodos de cura indicados na Norma Europeia EN 1015-11:1999/A1:2006 [27] e na Norma ASTM C 109/C 109M [2]. Os procedimentos estabelecidos por estas normas são evidenciados no quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Condições de cura das argamassas

Norma	Tipo de argamassa	Condições de cura		Tempo de cura até ao ensaio mecânico
EN 1015-11	Argamassas de cal aérea	Primeiros 7 dias com $95 \pm 5\%$ HR e os restantes 21 dias com $65 \pm 5\%$ HR/os provetes são retirados dos moldes ao completarem 5 dias de cura	Temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$	28 dias
	Argamassas de cal aérea e cimento/massa de cimento $\leq 50\%$ da massa total de ligante	Primeiros 7 dias com $95 \pm 5\%$ HR e os restantes 21 dias com $65 \pm 5\%$ HR/os provetes são retirados dos moldes ao completarem 5 dias de cura		
	Argamassas de cal aérea e cimento/massa de cal aérea $\leq 50\%$ da massa total de ligante	Primeiros 7 dias com $95 \pm 5\%$ HR e os restantes 21 dias com $65 \pm 5\%$ HR/os provetes são retirados dos moldes ao completarem 2 dias de cura		
	Argamassas com outros ligantes hidráulicos	Primeiros 7 dias com $95 \pm 5\%$ HR e os restantes 21 dias com $65 \pm 5\%$ HR/os provetes são retirados dos moldes ao completarem 2 dias de cura		
ASTM C 109/C 109M	Argamassas de cimento portland	Nas primeiras 20 a 72 horas os provetes permanecem nos moldes com HR $\geq 95\%$ /após serem retirados dos moldes, devem ser imersos em água saturada com Ca(OH)_2 até à altura do ensaio	Temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$	24 horas
				3 dias
				7 dias
				28 dias

As divergências entre os procedimentos são múltiplas. Tendo conhecimento da influência que as condições de cura representam, é explícito que argamassas com formulações idênticas ensaiadas pela Norma Europeia ou pela Norma ASTM irão apresentar diferenças significativas nas suas resistências mecânicas.

Na norma EN 1015-11 existe a preocupação de adaptar as especificações ao tipo de argamassa a ensaiar. Porém, o procedimento só difere nos dias de cura necessários para se removerem os provetes dos respectivos moldes. Em argamassas de cal aérea ou de ligantes mistos, em que a massa de cal aérea é superior a 50% da massa total de ligante, os provetes devem permanecer mais tempo nos moldes, em comparação com

argamassas com maior teor de ligante hidráulico. Relativamente à norma ASTM C 109/C 109M, é peremptória a sua adequação para argamassas de cimento Portland. O método definido é totalmente direccionado para a hidratação dos componentes hidráulicos do cimento e os reduzidos tempos de cura que antecedem os ensaios mecânicos são impraticáveis para argamassas com ligantes aéreos.

Em ambas as normas os períodos de cura estipulados são insuficientes para o ensaio de argamassas de cal aérea.

4. MATERIAIS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS EM ESTUDO

No âmbito desta dissertação foram formulados dois tipos distintos de argamassas de cal. Uma das argamassas teve como ligante a cal aérea hidratada em pó CL 90-S, sendo que na outra se utilizou cal hidráulica NHL 5. O agregado que incorporou ambas as argamassas foi idêntico e tratou-se de uma mistura de partes iguais de areia de rio e de areeiro. As diferentes amassaduras realizadas foram conseguidas com o recurso a água potável proveniente da rede pública.

Neste 4º capítulo pretende-se descrever as especificidades inerentes a estes materiais, seja na sua forma individual ou misturados entre si.

4.1 Ligantes

A argamassa é um material resultante da mistura de agregados, usualmente areias, com um ou mais ligantes e água. Embora o agregado e a água utilizada assumam importância assinalável, as características evidenciadas pela argamassa são, em grande parte, um reflexo da natureza do ligante empregue [56].

Os ligantes utilizados no decorrer deste estudo, a cal aérea e a cal hidráulica, inserem-se na categoria dos *ligantes hidrófilos*. São constituídos por matéria sólida finamente pulverizada que após a sua amassadura com água, forma uma pasta que endurece. Tal como qualquer ligante, podem incorporar os agregados pretendidos.

4.1.1 Pedra calcária e ligantes que dela derivam

A pedra calcária e os materiais que resultam da sua cozedura constituem uma das bases fundamentais da indústria a nível mundial. As suas diversas aplicações e funções estendem-se a uma multiplicidade de actividades, tais como a metalurgia, a construção de edifícios, a estabilização de solos para a construção de vias de comunicação ou mesmo, a agricultura. O valor da pedra calcária e dos seus derivados para a sociedade contemporânea é salientado por Boynton ao afirmar o seguinte: *“Literally any object that exists in man’s home, his office (or virtually any manufactured product) has required lime or limestone in some phase of its*

manufacture, directly or indirectly, either as a prime or incidental processing material...” [6].

As pedras calcárias de maior pureza podem-se agrupar em dois tipos, as constituídas por 100% de carbonato de cálcio (CaCO_3), também designado por calcite ou aragonite e as que consistem apenas em dolomite pura [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)$], com a seguinte composição, 54,3% de carbonato de cálcio (CaCO_3) e 45,7% de carbonato de magnésio (MgCO_3). Porém, não existem pedras calcárias com este grau de pureza disponíveis para fins comerciais [6]. Em associação a estas pedras existem, na grande maioria das vezes, impurezas na forma de argila, silte e areia, ou ainda outros tipos de sílica como o quartzo. O teor de impurezas da pedra calcária irá determinar a sua classe e os ligantes que derivam da sua decomposição (ver fig. 4.1). Apesar da enorme variedade de pedras calcárias existentes, apenas serão expostas aquelas que revelem interesse para o presente estudo.

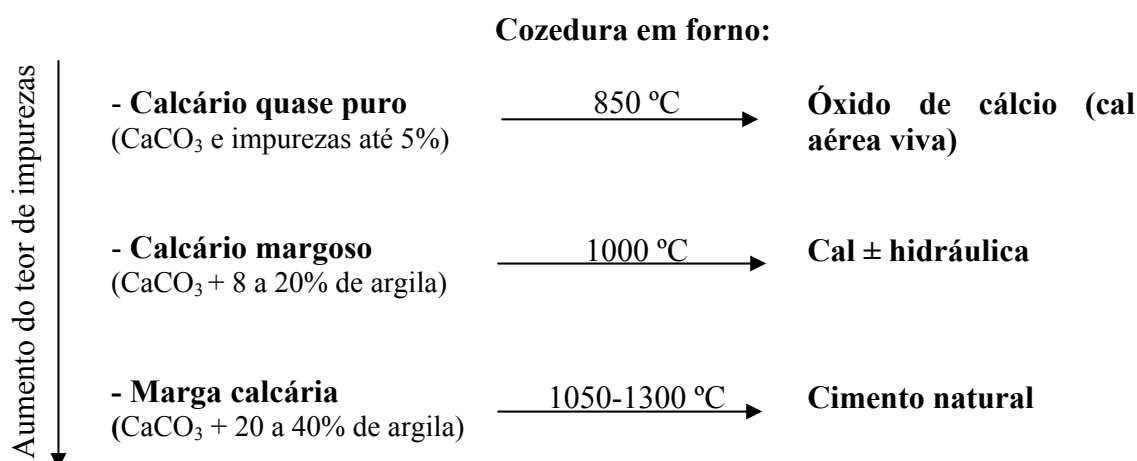


Fig. 4.1 – Pedras calcárias em função do seu teor de impurezas e ligantes que delas derivam

4.1.2 Cal

A cal tem sido utilizada na construção de edificações ao longo de milhares de anos. Existem teorias que associam as suas primeiras aplicações à Idade da Pedra e ao Homem Primitivo. É provável que a descoberta do processo de transformação da pedra calcária em cal tenha sido por mero acaso. Naquela época o Homem utilizava a pedra calcária para confinar as fogueiras. O calor produzido pelo fogo pode ter calcinado o

calcário gerando óxido de cálcio que, posteriormente, terá sido hidratado pela acção das chuvas e transformado em hidróxido de cálcio [6].

Exemplos concretos da utilização da cal como ligante foram encontrados na Palestina e na Turquia e datam de 12000 AC [15].

Os Egípcios erigiram as suas pirâmides, construções ainda intactas e admiradas por todos os que as contemplam, recorrendo à cal como ligante nas argamassas de assentamento de blocos e revestimento entre 4000 e 2000 AC. Posteriormente, tanto os Gregos como os Romanos beneficiaram da sabedoria transmitida pelos Egípcios em relação às técnicas construtivas e às especificidades da cal. Os seus povos aplicaram a cal nas suas edificações e na construção de vias de comunicação que, na altura, promoveu o seu enorme desenvolvimento e disseminação pela Europa. Verifica-se que algumas destas construções, apesar de apresentarem marcas resultantes da erosão ao longo do tempo, permaneceram intactas até aos dias de hoje. Porém, as argamassas utilizadas nas operações de conservação dos revestimentos e do refechamento de juntas, constituídas por ligantes modernos e supostamente mais eficientes, degradam-se em poucos anos [6].

4.1.2.1 Cal aérea

A cal aérea é o ligante que resulta da decomposição de calcários com um teor de impurezas inferior a 5%. Os calcários em causa poderão ser compostos apenas por carbonato de cálcio (CaCO_3) ou ter também alguma percentagem de carbonato de magnésio (MgCO_3). O processo de decomposição desencadeia-se por um aumento da temperatura actuante e designa-se por calcinação da pedra calcária. Quando a temperatura é de 894 °C atinge-se a pressão de dissociação do carbonato de cálcio e o dióxido de carbono é expulso do calcário, obtendo-se grãos porosos de óxido de cálcio, também conhecido como cal viva [10] (ver fórmula 4.1). O processo de decomposição dos calcários em cal aérea é reversível. O fenómeno cíclico patente neste material é designado pela comunidade científica como o Ciclo da Cal (ver fig. 4.2).

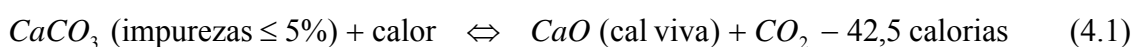
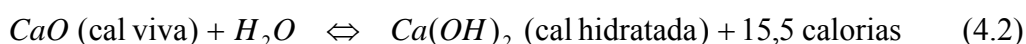




Fig. 4.2 – Ciclo da Cal [84]

A cal viva resultante da calcinação é um material sólido, de cor branca, que tende a reagir bastante facilmente com a água, dando origem ao hidróxido de cálcio, também conhecido como cal apagada ou extinta. O processo de hidratação do óxido de cálcio designa-se por extinção da cal viva e consiste numa reacção exotérmica com grande quantidade de calor libertado (ver fórmula 4.2) [15].

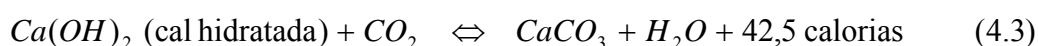


A extinção da cal viva pode gerar cal hidratada em pó ou em pasta, consoante a quantidade de água empregue na reacção. Se a água for apenas a estritamente necessária à hidratação, obtém-se a cal aérea hidratada em pó. Caso se utilize água em excesso, o produto gerado irá ser uma pasta de cal. Após a hidratação, a pasta de cal é armazenada sob uma camada de água em recipientes fechados, impedindo a carbonatação. A pasta deverá ser sujeita a este processo de maturação por um período de tempo superior a 3 meses antes de qualquer aplicação, para que o óxido de cálcio que ainda exista se converta em hidróxido de cálcio (portlandite) e para que os cristais de portlandite assumam igual tamanho e distribuição ao longo de toda a pasta [50].

Posteriormente, é necessário misturar a cal hidratada com um agregado e água para formar a argamassa, sendo que no caso da cal em pasta a adição de água é mínima

ou mesmo dispensável. O agregado desempenha uma função importante no comportamento da argamassa visto que reduz a fissuração imposta pela retracção no momento da secagem e aumenta a resistência mecânica e a porosidade da argamassa, facilitando a carbonatação.

Numa primeira fase o endurecimento da argamassa processa-se devido à perda de água que está em excesso, sendo que uma parte evapora-se e outra parte é absorvida pela superfície porosa do suporte. Seguidamente, desencadeia-se o processo de carbonatação, que consiste na conversão do hidróxido de cálcio, em associação com o dióxido de carbono, em carbonato de cálcio (ver fórmula 4.3). A água presente nos poros internos da argamassa é crucial para a dissolução do dióxido de carbono e das partículas de hidróxido de cálcio. Nesta água ácida formam-se iões Ca^{2+} e CO_3^{2-} que, quando combinados, dão origem ao carbonato de cálcio. O processo descrito irá prologar-se até que toda a quantidade de hidróxido de cálcio seja convertida em carbonato de cálcio ou até que a água presente nos poros tenha evaporado devido ao calor gerado pela reacção [15].



Com o completar do processo de carbonatação atinge-se o ponto de partida do Ciclo da Cal, ou seja, obtém-se o composto químico que foi inicialmente calcinado (CaCO_3).

Após o seu endurecimento, as argamassas de cal aérea apresentam valores de resistência à compressão entre 0,5MPa e 2,0MPa, dependendo do traço volumétrico utilizado (ligante/agregado) e das condições de cura. São valores muito inferiores aos registados nas argamassas de cimento e nas argamassas de cal hidráulica. As argamassas com menores resistências mecânicas, tais como as argamassas de cal aérea, são mais adequadas em intervenções de conservação em edifícios históricos, pois actuam como materiais de sacrifício, absorvendo as tensões provenientes da alvenaria e protegendo-a dos agentes de degradação [50].

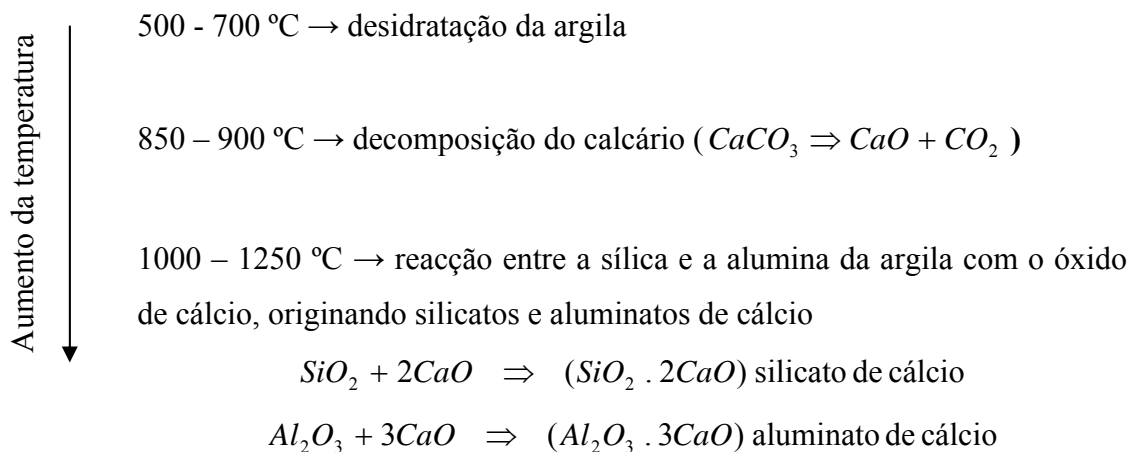
4.1.2.2 Cal hidráulica

A cal hidráulica natural (NHL) resulta da cozedura de calcários com um teor de impurezas na ordem dos 8 a 20%, essencialmente argilas. Na categoria das cals hidráulicas inserem-se ainda as cals resultantes da cozedura de calcários puros misturados com argilas (cals hidráulicas artificiais) e as cals resultantes da reacção entre o hidróxido de cálcio e cinzas vulcânicas ricas em sílica e alumina, designadas pozolanas naturais.

O fabrico de cal hidráulica através da adição de cinzas vulcânicas ou cerâmica moída à cal aérea hidratada, de forma a aumentar as resistências mecânicas e melhorar as condições de hidraulicidade das argamassas produzidas, foi identificado em construções que datam do século X AC. Porém, esta prática só foi documentada séculos mais tarde, durante o Império Romano, por Vitruvius [7].

A cal hidráulica natural possui a capacidade de endurecer quando lhe é adicionada água e a sua cura efectiva-se tanto ao ar como debaixo de água. As impurezas presentes na sua constituição, tais como a sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3), são a principal causa da sua hidraulicidade. Quando o calcário margoso é aquecido a temperaturas entre os 1000 °C e os 1250 °C, desencadeia-se uma reacção entre a sílica e a alumina com o óxido de cálcio, levando à formação de silicatos e aluminatos de cálcio [46].

Na preparação da cal hidráulica verificam-se três fases distintas à medida que a temperatura de cozedura aumenta [10]:



Deste processo de cozedura resultam, não só os aluminatos e silicatos de cálcio, mas também uma percentagem de cal viva (óxido de cálcio) na ordem dos 3 a 10%, que deverá ser convertida em hidróxido de cálcio através da sua hidratação. A água empregue na extinção da cal viva deve ser apenas a estritamente necessária à sua hidratação, visto que água em excesso iria hidratar os silicatos e aluminatos de cálcio. Na extinção regista-se uma reacção expansiva da cal viva, aumentando o seu volume significativamente e pulverizando os grãos constituídos pelos silicatos e aluminatos.

O endurecimento da cal hidráulica processa-se através de duas fases distintas, a fase aérea e a fase hidráulica ou química. A fase aérea corresponde à carbonatação do hidróxido de cálcio por associação com o dióxido de carbono da atmosfera e a fase hidráulica é caracterizada pela hidratação dos aluminatos tricálcicos e dos silicatos bicálcicos com a água empregue na amassadura, originando os hidrosilicatos e hidroaluminatos de cálcio [37].

A presa inicial das argamassas de cal hidráulica é relativamente expedita visto que os compostos hidratados formam-se e cristalizam ao longo dos 28 dias posteriores à amassadura. O endurecimento das argamassas não se restringe a este período, a carbonatação caracterizada pela fase aérea é um processo bastante moroso que se prolonga ao longo de vários meses.

As cals hidráulicas naturais são classificadas em três categorias de acordo com o seu grau de hidraulicidade, avaliado pelo *Cementation Index (CI)* [6]:

Quadro 4.1 – Grau de hidraulicidade das cals hidráulicas naturais

Tipo de cal hidráulica	Cementation Index (CI)
Cal fracamente hidráulica (NHL2)	0,30 – 0,50
Cal medianamente hidráulica (NHL3,5)	0,50 – 0,70
Cal eminentemente hidráulica (NHL5)	0,70 – 1,10

O Cementation Index baseia-se na seguinte fórmula [6]:

$$C.I. = \frac{2,8 \times \%SiO_2 + 1,1 \times \%Al_2O_3 + 0,7 \times \%Fe_2O_3}{\%CaO + 1,4 \times \%MgO} \quad (4.4)$$

Da fórmula 4.4 podem ser retiradas duas ilações de importância assinalável. O grau de hidraulicidade das cals hidráulicas é proporcional à quantidade de óxidos de sílica, alumina e ferro existentes na sua constituição e inversamente proporcional aos teores de óxido de cálcio e óxido de magnésio.

As resistências à compressão das argamassas de cal hidráulica aos 28 dias são as seguintes: 2,0MPa a 7,0MPa para a cal fracamente hidráulica (NHL2), 3,5MPa a 10MPa para a cal medianamente hidráulica (NHL3,5) e 5,0MPa a 15MPa para a cal eminentemente hidráulica (NHL5). O número que se coloca à frente da designação NHL corresponde à resistência à compressão mínima expectável em MPa, 28 dias após a amassadura das argamassas [50].

4.2 Agregados

No trabalho experimental em que se baseou esta dissertação, o agregado utilizado na formulação das argamassas foi uma mistura de partes iguais de areia de rio e de areeiro.

Ambas as areias utilizadas são siliciosas. A areia de areeiro, também designada por areia amarela, possui uma superfície áspera devido aos grãos angulosos que a constituem e um elevado teor de finos argilosos. Os finos da argila conferem um aumento da coesão e da trabalhabilidade das argamassas mas, por outro lado, podem dificultar a ligação dos grãos de areia com o ligante e implicar a necessidade de adicionar maior quantidade de água na amassadura. A areia de rio é constituída por grãos rolados de dimensões variáveis com reduzido teor de impurezas associadas [37].

Nas argamassas a areia actua como o seu esqueleto, separando as partículas de hidróxido de cálcio para facilitar a carbonatação e distribuindo as retracções que eventualmente decorram da cura, ao longo de toda a massa.

As características da areia empregue na amassadura são fundamentais para se obter o desempenho desejado da argamassa formulada. Factores como a dureza, a forma dos grãos, a granulometria, a porosidade, a sua origem e estado de limpeza têm grande influência na qualidade final das argamassas. Desejavelmente, pretende-se uma areia bem graduada com reduzido volume de vazios. As areias com maior volume de vazios

exigem traços mais ricos em ligante, dando origem a argamassas com elevada retracção [51].

Com o intuito de avaliar a influência que o tipo de agregado tem nas características de argamassas correntes utilizadas na reabilitação de edifícios foram desenvolvidos dois estudos recentes, cujos resultados experimentais revelam bastante interesse para esta dissertação. Em ambos os estudos pretende-se estimar as consequências da utilização de um agregado misto, envolvendo partes iguais de areia de rio e de areeiro, em relação ao uso de apenas um dos tipos de areia.

Margalha et al [51] concluiu que a mistura da areia de rio com a areia de areeiro confere às argamassas de cal aérea maiores resistências mecânicas, tanto em compressão como em flexão. Em relação ao comportamento face à água, as argamassas com agregado misto apresentaram coeficientes de absorção de água por capilaridade inferiores aos evidenciados nas argamassas apenas com areia de rio ou com areia de areeiro. As argamassas apenas com areia de areeiro registaram o pior desempenho, tanto a nível mecânico como no comportamento face à água.

No trabalho de investigação elaborado por Faria et al [34] as conclusões foram similares. Verificou-se um efeito benéfico na utilização de agregado misto de areia de rio e de areeiro em termos de redução da quantidade de água de amassadura, aumento da compacidade das argamassas, aumento das suas resistências mecânicas e redução da absorção capilar, quer em termos da velocidade com que se desenvolve nos primeiros instantes de contacto com a água (coeficiente de capilaridade), como ao nível da quantidade total de água absorvida (valor assintótico). O incremento da compacidade das argamassas com mistura de areias traduziu-se numa redução da sua permeabilidade ao vapor de água.

4.3 Qualidade da água empregue e suas particularidades

A água está presente e interfere de forma crucial no Ciclo da Cal. Numa fase inicial emprega-se na extinção da cal viva (óxido de cálcio) e, posteriormente, a sua função é essencial na amassadura das argamassas e na subsequente carbonatação. Devido à importância demonstrada, a qualidade deste material não deverá ser menosprezada.

4.3.1 Extinção da cal viva

No processo de extinção da cal viva, a água potável e até mesmo a água salobra, com maior quantidade de sais dissolvidos, assumem comportamentos satisfatórios. Em oposição, águas recicladas com elevado teor de sulfitos e sulfatos podem revelar-se prejudiciais em relação à qualidade final da cal hidratada.

Em conclusão de um estudo de investigação, Boynton [6] enuncia os condicionalismos a equacionar na escolha da água mais adequada para a extinção da cal viva:

- A água reciclada proveniente da escovagem de dióxido de enxofre (SO_2), produzido em certos processos industriais, é desadequada para a hidratação da cal viva visto que aumenta o tempo necessário para a hidratação e diminui a reactividade da cal apagada. O produto da reacção consiste em partículas granulares de alguma dimensão, cuja sedimentação é bastante expedita. Surpreendentemente, esta água pode ser utilizada para diluir a pasta resultante do processo de hidratação sem que se verifiquem consequências nefastas;
- A água utilizada não deve conter mais de 500 mg/l de iões em suspensão tais como: sulfitos, sulfatos e bissulfatos;
- As águas com alta concentração de cloreto de sódio dissolvido apresentam uma eficácia surpreendente na hidratação da cal viva, acelerando o processo. Porém, problemas como a corrosão metálica terão de ser equacionados numa futura aplicação da cal. Nesta categoria estão inseridas a água do mar e a água salobra.

4.3.2 Amassadura e presa das argamassas

Na fase seguinte, correspondente à amassadura das argamassas e ao posterior endurecimento, a água desempenha três funções fundamentais [14]:

- Confere plasticidade à mistura de partículas sólidas composta pelo ligante e agregados;
- No processo de carbonatação da cal aérea actua como catalisador, assegurando a dissolução do dióxido de carbono e do hidróxido de cálcio;
- No caso da cal hidráulica, é responsável pela fracção mais substancial do seu endurecimento, hidratando os silicatos e aluminatos de cálcio.

4.3.2.1 Escolha da água mais adequada

No que se refere ao processo de mistura das argamassas de cal, a água potável é a mais apropriada. As águas a evitar neste tipo de tarefa são as seguintes [14]:

- Águas puras, tais como as águas graníticas, designadas como ácidas. Devido à ausência de carbonato na sua composição têm tendência a dissolver a cal em cerca de 1,6 g/l e, por este facto, não devem ser utilizadas na amassadura de argamassas com base neste ligante;
- As águas que contêm na sua constituição selenite (variedade de gesso) possuem elevado teor de sulfatos e ao interagirem com a cal originam a formação de cristais como a etringite. O carácter expansivo destes cristais alojados nos poros da argamassa pode comprometer a sua durabilidade. Geralmente, estas águas podem ser encontradas nas proximidades de explorações de gesso;
- Outra categoria a evitar são as águas recicladas. Por norma, tratam-se de águas ácidas que tendem a reagir com a cal, dando origem a um outro composto;
- Por último, a água do mar, muitas vezes utilizada nas argamassas de construções situadas junto à orla costeira, propicia anomalias tais como eflorescências e criptoflorescências. Os sulfatos e cloretos de magnésio existentes na composição da água do mar são responsáveis pelos malefícios enunciados.

4.3.2.2 Quantidade óptima de água

A quantidade de água que melhor se ajusta à amassadura de determinada argamassa é bastante difícil de aferir, visto que depende de diversos factores. O propósito a que se destina a argamassa, podendo ser aplicada como reboco interior ou exterior, no refechamento de juntas ou ainda em grouts (caldas utilizadas para aumentar a compacidade da alvenaria), a humidade, a baridade e a granulometria do agregado e ainda, a cal a utilizar, seja ela cal hidráulica, cal aérea em pasta ou cal aérea hidratada em pó, são factores que condicionam a quantidade de água a empregar na amassadura.

Como se referiu, a singularidade de cada argamassa e dos seus desígnios não permite estimar, de forma abrangente, qual a quantidade de água apropriada, sendo que esta deve ser equacionada em cada caso específico. Apesar disto, existem linhas orientadoras que explicitam, em traços gerais, quais as consequências que derivam do excesso ou da escassez de água na amassadura. Quando a água é insuficiente, a

trabalhabilidade da argamassa é diminuta e o seu endurecimento é incompleto. No caso da cal aérea, a dissolução do dióxido de carbono cessa por falta de água e o processo de carbonatação é impedido. O endurecimento da cal hidráulica é também comprometido devido à ausência de água necessária à hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio. Por oposição, o excesso de água irá implicar uma retracção excessiva ao longo do período de presa das argamassas, originando fissuração [14].

4.4 Argamassas de cal

As potencialidades demonstradas pelas argamassas de cal na reabilitação de edifícios, nomeadamente edifícios antigos de valor histórico e cultural, relativamente à sua compatibilidade química e mecânica com os materiais que constituem as alvenarias antigas, potenciaram um interesse crescente acerca das suas especificidades e aplicabilidades. Apesar das investigações já desenvolvidas, o domínio da tecnologia da cal é ainda bastante limitado. O surgimento do cimento Portland no século XIX contribuiu, em larga escala, para esta falta de conhecimentos relativamente às técnicas construtivas com recurso a argamassas de cal. As argamassas à base deste novo ligante atingiam resistências mecânicas muito elevadas num curto período de tempo e possibilitavam a construção de estruturas que até à data se julgavam impossíveis de erigir. Todos estes factores arredaram, quase por completo, as argamassas de cal do mundo da construção e só muito recentemente começaram a integrar novamente intervenções compatíveis com as suas características, tais como operações de conservação.

Apesar das diferenças anteriormente evidenciadas nos pontos 4.1.2.1 e 4.1.2.2 entre as argamassas de cal aérea e as argamassas de cal hidráulica, é possível indicar as características principais que geralmente as retratam [56]:

- Baixas resistências mecânicas, devido à fraca ligação estabelecida entre as partículas de calcite (carbonato de cálcio) e à reduzida afinidade entre estas e os cristais de quartzo do agregado;
- Boa trabalhabilidade, causa directa do demorado processo de endurecimento por carbonatação, que depende das condições ambientais;

- Grande capacidade de deformação, traduzida por um módulo de elasticidade baixo. Esta característica permite à argamassa absorver pequenos deslocamentos do suporte;
- Elevada permeabilidade à água e ao vapor de água;
- Baixa resistência em relação aos ciclos de gelo-degelo.

As características mencionadas não devem ser consideradas como verdades absolutas, aplicáveis a todo um espectro de argamassas de cal existentes. No caso das argamassas de cal hidráulica, as suas propriedades podem diferir bastante, consoante o grau de hidraulicidade do ligante utilizado. Nas cal hidráulicas naturais, quanto maior é o seu grau de hidraulicidade, menor é o teor de hidróxido de cálcio logo, as características que derivam da existência destas partículas são atenuadas. Além deste facto, as propriedades das argamassas de cal são directamente influenciáveis pelo processo de mistura e ambiente de cura, pelo tipo de agregado utilizado e pelas relações ligante/agregado e água/ligante.

Um estudo experimental foi desenvolvido na Universidade Nova de Lisboa com o propósito de comparar argamassas frequentemente aplicadas na conservação de edifícios antigos [61]. Entre um lote de dez argamassas com diferentes formulações estiveram em análise duas consideradas como argamassas de cal aérea e uma argamassa de cal hidráulica.

Em termos de absorção de água por capilaridade, as argamassas de cal aérea registaram um elevado coeficiente de capilaridade mas um valor assintótico bastante baixo. A argamassa de cal hidráulica apresentou comportamento inverso, com reduzida absorção de água nos instantes iniciais e valor assintótico mais elevado. Como era expectável, a argamassa de cal hidráulica adquiriu resistências mecânicas muito superiores às registadas nas argamassas de cal aérea, com ênfase no módulo de elasticidade. As elevadas resistências mecânicas conferem a estas argamassas um bom comportamento face às tensões desenvolvidas pelos sais solúveis utilizados nos ensaios realizados, tais como os cloretos e os sulfatos. Apesar das potencialidades demonstradas no estudo pela argamassa de cal hidráulica, a sua incompatibilidade mecânica com as alvenarias antigas, aliada ao facto destas argamassas libertarem sais solúveis capazes de originar cristais expansivos como a etringite e a taumasite, levam os autores desta

investigação a concluir que as argamassas de cal aérea são mais adequadas em intervenções de conservação cuja finalidade seja a protecção dos materiais do suporte.

Em termos de durabilidade, investigações recentes revelaram que as argamassas de cal aérea são susceptíveis de se degradarem mais rapidamente do que as argamassas de cal hidráulica [50]. Esta constatação não deverá constituir um entrave no contínuo estudo e utilização das argamassas de cal aérea devido a duas questões essenciais. Em primeira análise, a protecção das alvenarias antigas de valor histórico e cultural deve-se sobrepor à integridade das argamassas aplicadas. Em segundo lugar, é provável que os maus resultados obtidos pelas argamassas de cal aérea nos ensaios de durabilidade sejam devidos à falta de domínio nas técnicas adequadas ao seu fabrico e aplicação. Os edifícios construídos há centenas de anos com recurso a estas argamassas, que prevaleceram até aos dias de hoje, são a prova indiscutível da durabilidade das argamassas de cal aérea quando manuseadas correctamente.

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

5. METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO E CAMPANHA DE ENSAIOS

5.1 Descrição das argamassas

No presente estudo foram ensaiados dois tipos de argamassas de cal com composições díspares entre si. No total, prepararam-se 72 provetes prismáticos com um volume individual de 256 cm³ (4x4x16 cm). Metade do lote destes provetes foi preparada com cal aérea hidratada em pó CL 90-S da marca LUSICAL e a outra metade com cal hidráulica NHL5 da marca SECIL MARTINGANÇA. As composições utilizadas nas misturas em termos de traços volumétricos foram: cal aérea e areia (1:2) e cal hidráulica e areia (1:3). A areia utilizada foi uma mistura de areia de rio e de areeiro (1:1).

Cada uma destas metades foi ainda subdividida, tendo como objectivo comparar os dois processos de mistura em estudo, baseados nas normas ASTM C305 [3] e EN 1015-2:1998/A1:2006 [20].

Em suma, efectuaram-se 4 amassaduras individuais, resultando cada uma delas em 18 provetes. Posteriormente, cada um destes conjuntos foi dividido em lotes de 6 provetes, armazenados em 3 ambientes de cura com temperatura constante de 20 °C e humidades relativas de 50%, 65% e 95%.

5.2 Identificação das argamassas

Para uma identificação inequívoca dos provetes a ensaiar, foi estabelecido um código de 2 letras e 1 número que individualiza cada um deles. A primeira letra é maiúscula e diz respeito ao ligante utilizado (A para a cal aérea e H para a cal hidráulica). A segunda letra do código é minúscula e designa o processo de mistura utilizado e as condições de cura em causa (a para a Norma Europeia EN 1015-2 e humidade relativa de 50% até f para a norma ASTM C305 e humidade relativa de 95%). O último dígito é um número sequencial atribuído a cada um dos 6 provetes dos diferentes conjuntos em análise.

A identificação preestabelecida das diferentes argamassas em análise está presente no seguinte quadro:

Quadro 5.1 – Codificação das argamassas

Código	Descrição
Aa (1 a 6)	- Cal aérea e areia, preparada segundo a Norma EN 1015-2 e com cura de 50% HR
Ab (1 a 6)	- Cal aérea e areia, preparada segundo a Norma EN 1015-2 e com cura de 65% HR
Ac (1 a 6)	- Cal aérea e areia, preparada segundo a Norma EN 1015-2 e com cura de 95% HR
Ad (1 a 6)	- Cal aérea e areia, preparada segundo a Norma ASTM C305 e com cura de 50% HR
Ae (1 a 6)	- Cal aérea e areia, preparada segundo a Norma ASTM C305 e com cura de 65% HR
Af (1 a 6)	- Cal aérea e areia, preparada segundo a Norma ASTM C305 e com cura de 95% HR
Ha (1 a 6)	- Cal hidráulica e areia, preparada segundo a Norma EN 1015-2 e com cura de 50% HR
Hb (1 a 6)	- Cal hidráulica e areia, preparada segundo a Norma EN 1015-2 e com cura de 65% HR
Hc (1 a 6)	- Cal hidráulica e areia, preparada segundo a Norma EN 1015-2 e com cura de 95% HR
Hd (1 a 6)	- Cal hidráulica e areia, preparada segundo a Norma ASTM C305 e com cura de 50% HR
He (1 a 6)	- Cal hidráulica e areia, preparada segundo a Norma ASTM C305 e com cura de 65% HR
Hf (1 a 6)	- Cal hidráulica e areia, preparada segundo a Norma ASTM C305 e com cura de 95% HR

5.3 Condições de cura estabelecidas

Numa primeira fase, imediatamente após as sucessivas amassaduras, todos os moldes de aço contendo os provetes foram colocados num ambiente caracterizado por 20 °C de temperatura e 65% de humidade relativa durante um período de 7 dias. Ao terminar esta cura inicial os provetes foram removidos dos seus respectivos moldes e armazenados nos 3 ambientes de cura distintos, inicialmente estabelecidos. Do lote total, 24 provetes permaneceram no ambiente de cura inicial e os restantes 48 provetes foram divididos em 2 lotes com igual número e armazenados em câmaras climáticas com ambientes controlados, caracterizados pela temperatura de 20 °C e humidades relativas de 50% e 95%.

Antes de iniciar este estudo experimental, ainda numa fase de planeamento, propôs-se que os períodos de cura mais adequados seriam de 60 dias para os provetes de cal aérea e 28 dias para os provetes de cal hidráulica. Porém, estes períodos não foram respeitados devido a uma avaria imprevista na célula de carga do aparelho que testa as resistências mecânicas. Determinou-se que os provetes permanecessem nos seus respectivos ambientes de cura até que a anomalia fosse rectificada. Tal facto não interferiu nos resultados experimentais e nas conclusões que daí derivaram, visto que todos os provetes caracterizados pelo mesmo ligante estiveram em iguais condições. Os provetes de cal aérea permaneceram em cura durante 2 meses e 10 dias, enquanto que os provetes de cal hidráulica tiveram um período de cura sensivelmente menor, 1 mês e 25 dias.

5.4 Ensaios realizados

Na preparação das amassaduras foi necessário determinar a baridade dos agregados (areia de rio, areia de areeiro e mistura entre as duas areias) e dos ligantes (cal aérea e cal hidráulica).

Nos instantes que se seguiram ao processo de mistura, avaliou-se a consistência por espalhamento das argamassas antes de se proceder à moldagem.

Após a fase de cura, todos os provetes foram condicionados numa estufa ventilada a 60 °C até atingirem massa constante, com o intuito de se iniciar a série de ensaios predefinidos. Este procedimento traduz-se no terminar do processo de carbonatação e do respectivo endurecimento das argamassas, visto que a associação

entre o dióxido de carbono e o hidróxido de cálcio não é viável em ambientes completamente secos [15].

De forma a caracterizar as argamassas em estudo em relação às suas propriedades inerentes e avaliar as repercussões que os diferentes processos de mistura e cura tiveram sobre estas, realizaram-se os seguintes ensaios:

- A determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi realizada para a totalidade dos provetes de cada lote;
- Posteriormente, 3 provetes de cada um dos conjuntos de 6 foram utilizados para avaliar as resistências mecânicas, procedendo-se às determinações das resistências à tracção por flexão e à compressão;
- As amostras resultantes do ensaio de compressão foram seguidamente utilizadas nas determinações da massa volúmica e da porosidade aberta;
- Os restantes 3 provetes de cada lote de 6 foram necessários para avaliar a absorção de água e o índice de secagem.

5.4.1 Procedimentos de ensaio

5.4.1.1 Baridade

Antes de se iniciar as amassaduras previstas foi necessário determinar as baridades das matérias-primas que iriam incorporar as argamassas. A metodologia efectuada é essencial para avaliar quais as quantidades necessárias de cada constituinte para se prepararem os provetes pretendidos com os traços volumétricos preestabelecidos. As matérias-primas em estudo foram, a cal aérea hidratada em pó da marca Lusical, a cal hidráulica NHL5 da marca SECIL MARTINGANÇA, areia de rio, areia de areeiro e uma mistura entre as duas areias com traço volumétrico de (1:1) (ver figs. 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4). O procedimento utilizado baseou-se na ficha de ensaio Fe 15 (UNL/DEC) [74], que se destina à determinação da massa de material seco que preenche um recipiente de capacidade conhecida. No presente estudo o processo de compactação não foi realizado tal como descrito na ficha de ensaio Fe 15. A única forma de compactação resultou da força exercida pelo material após a queda de uma altura estipulada.



Fig. 5.1 – Cal aérea hidratada em pó



Fig. 5.2 – Cal hidráulica



Fig. 5.3 – Areia de rio



Fig. 5.4 – Areia de areiro

Procedimento:

1 - Determinação da capacidade do recipiente de ensaio:

No ensaio foram utilizados dois recipientes com capacidades nominais diferentes. Um dos recipientes, o de menor capacidade, foi utilizado para a determinação da baridade dos ligantes e o seu volume já tinha sido determinado anteriormente. Em relação ao recipiente de maior capacidade, utilizado para a determinação da baridade dos agregados, teve de se determinar o seu volume através do procedimento que se segue.

- 1) Determina-se a massa do recipiente m_0 em kg;
- 2) Enche-se o recipiente com água à temperatura ambiente, tapa-se com uma chapa de vidro tendo o cuidado de retirar todas as bolhas de ar que fiquem sob esta e determina-se a massa do conjunto m_1 (ver figs. 5.5 e 5.6);
- 3) Retira-se a chapa de vidro e determina-se a temperatura da água t_a (ver fig. 5.7);

- 4) Escoa-se a água e secam-se cuidadosamente o recipiente e a chapa de vidro;
- 5) Determina-se a massa do conjunto m_2 , recipiente e chapa de vidro, já seco;
- 6) Através da fórmula 5.1 determina-se a capacidade do recipiente V em litros;

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho} \quad (5.1)$$

Em que:

ρ é a massa volúmica da água à temperatura t_a (ver quadro 5.2)

As massas são expressas em kg

Quadro 5.2 – Massa volúmica da água em relação à sua temperatura

Temperatura (°C)	ρ (kg/dm ³)
10	0,9997
14	0,9993
15	0,9991
23	0,9976

- 7) O procedimento descrito é realizado 3 vezes consecutivas, obtendo-se posteriormente o valor médio e o respectivo desvio padrão.



Fig. 5.5 – Colocação da chapa de vidro sobre o recipiente cheio de água

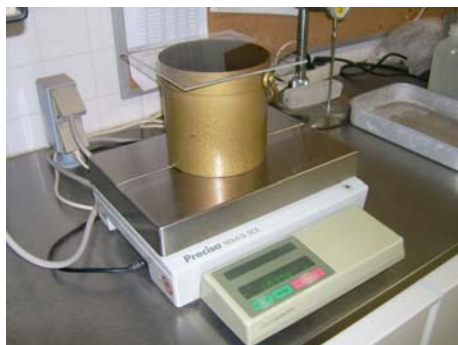


Fig. 5.6 – Determinação da massa m_1



Fig. 5.7 – Determinação da temperatura da água t_a

2 - Determinação da baridade:

Antes de se iniciar o ensaio ambas as areias foram colocadas numa estufa ventilada a 105 ± 5 °C até atingirem massa constante. Considera-se que a massa é constante quando a diferença entre duas pesagens sucessivas, realizadas com um intervalo de 4 horas, é menor que 0,2% da massa do provete. Relativamente aos ligantes

este procedimento inicial não foi necessário, visto que estavam armazenados em recipientes fechados e num ambiente controlado com 20 °C de temperatura e 65% de humidade relativa.

- 1) Determina-se a massa do recipiente de ensaio m_0 em kg. A massa do recipiente de ensaio de maior capacidade já tinha sido determinada anteriormente quando se avaliou o seu volume;
- 2) Homogeneíza-se o material a ensaiar;
- 3) Coloca-se o recipiente de ensaio sobre uma superfície plana e verte-se o material seco através de um funil de sólidos até que o recipiente tenha o seu volume completamente preenchido. A distância entre o bordo inferior do funil e o aro do recipiente de ensaio deverá corresponder a “3 dedos”, aproximadamente 5 cm (ver figs. 5.8 e 5.9);
- 4) Após completar o enchimento, nivela-se a superfície superior do recipiente rasando-a com uma régua metálica (ver fig. 5.10);
- 5) Determina-se a massa m_3 correspondente ao recipiente cheio com o material seco;
- 6) Calcula-se a baridade expressa em kg/m^3 através da fórmula 5.2;

$$Ba = \frac{m_3 - m_0}{V} \times 1000 \quad (5.2)$$

Em que:

V é a capacidade do recipiente de ensaio em dm^3

As massas são expressas em kg

- 7) O procedimento descrito é realizado 3 vezes consecutivas, obtendo-se posteriormente o valor médio e o respectivo desvio padrão.

Nota: Os valores das baridades foram posteriormente convertidos de kg/m^3 para g/cm^3 para uma maior facilidade de cálculo nos ensaios que se seguiram.



Fig. 5.8 – Recipiente de menor capacidade cheio de cal hidráulica e pronto a ser nivelado



Fig. 5.9 – Estrutura utilizada na determinação da baridade das areias



Fig. 5.10 – Processo de nivelamento da superfície superior do recipiente de maior capacidade

5.4.1.2 Realização das amassaduras e preparação dos provetes

A realização das amassaduras e a subsequente preparação dos provetes foram os processos de maior importância na série de ensaios experimentais desenvolvidos. O rigor na execução dos procedimentos descritos nas normas de ensaio em estudo foi determinante para atingir o objectivo pretendido, ou seja, avaliar a influência que os processos de mistura e cura têm nas características das argamassas endurecidas.

A preparação das argamassas baseou-se na ficha de ensaio Fe 19 (UNL/DEC) [75] e nas normas ASTM C305 [3] e EN 1015-2:1998/A1:2006 [20]. Foram realizadas quatro amassaduras individuais, resultando de cada uma delas 18 provetes. Efectuaram-se duas amassaduras segundo a norma ASTM C305 e duas de acordo com a norma EN 1015-2. Em ambos os casos, uma das amassaduras foi realizada com cal aérea e a outra com cal hidráulica.

A determinação da consistência por espalhamento das argamassas frescas foi realizada de acordo com a ficha de ensaio Fe 25 (UNL/DEC) [76].

Procedimento:**1 – Realização das amassaduras:**

Antes de se iniciar o procedimento experimental a mistura entre as areias de rio e de areeiro foi colocada numa estufa ventilada a 105 ± 5 °C até atingir massa constante. No período de preparação das amassaduras determinou-se as quantidades de cada constituinte de acordo com o número de provetes pretendido. Para calcular as massas de agregado e de ligante necessárias foi preciso avaliar o traço volumétrico e fazer a correspondência com o volume de cada constituinte. O volume foi posteriormente multiplicado pelas baridades correspondentes para se obter o valor de massa. Ao determinar o volume de agregado, este deverá ser igual ao volume necessário para perfazer a totalidade dos moldes, visto que o volume de ligante vai apenas preencher os vazios existentes entre as partículas da areia.

Para aferir a quantidade de água necessária para se obter o espalhamento no intervalo de 70% a 75% previamente definido, foi realizada uma amassadura de teste para um volume de argamassa de 768 cm^3 (3 provetes). O resultado obtido permitiu estimar qual a quantidade óptima de água a empregar na amassadura para os 18 provetes.

1.1 – Procedimento segundo a norma ASTM C305:

- 1) Coloca-se a pá e a cuba secas no misturador (ver fig. 5.11);
- 2) Coloca-se toda a quantidade de água da mistura na cuba;
- 3) Junta-se o ligante à água e liga-se o misturador na velocidade lenta de 140 ± 5 rpm durante 30 s;
- 4) Junta-se toda a quantidade de areia ao longo de um período de 30 s enquanto se mistura na velocidade lenta;
- 5) Pára-se o misturador, muda-se para a velocidade rápida de 285 ± 10 rpm e mistura-se durante 30 s;
- 6) Pára-se o misturador e deixa-se a argamassa repousar durante 90 s. Durante os primeiros 15 s deste intervalo raspa-se rapidamente para a amassadura alguma argamassa que possa estar depositada nas paredes da cuba. No tempo restante, tapa-se a cuba com um pano húmido;

- 7) Termina-se o procedimento misturando na velocidade rápida durante 60 s.

1.2 – Procedimento segundo a norma EN 1015-2:

- 1) Homogeneiza-se a componente sólida da mistura, areia e ligante;
- 2) Coloca-se a pá e a cuba secas no misturador;
- 3) Introduz-se toda a quantidade de água da mistura na cuba;
- 4) Liga-se o misturador na velocidade lenta de 140 ± 5 rpm e junta-se toda a componente sólida da mistura, areia e ligante, ao longo de um período de 30 s;
- 5) Termina-se o procedimento misturando à mesma velocidade durante mais 60 s.



Fig.5.11 – Misturador mecânico com 2 velocidades: lenta (rotação axial de 140 ± 5 rpm e movimento planetário de 62 ± 5 rpm) e rápida (rotação axial de 285 ± 10 rpm e movimento planetário de 125 ± 10 rpm)

2 – Determinação da consistência por espalhamento das argamassas frescas:

Imediatamente após a mistura das argamassas determinou-se a sua consistência por espalhamento, com o objectivo de avaliar a influência da quantidade de água da amassadura. Na preparação das argamassas tentou-se obter um espalhamento compreendido no intervalo entre 70% a 75%.

- 1) Coloca-se o molde tronco-cônico no centro da mesa de consistência;
- 2) Preenche-se o molde com argamassa através de duas camadas com igual espessura. Cada camada é compactada com um varão metálico com 15 mm de diâmetro (ver figs. 5.12, 5.13 e 5.14);

- 3) Após o total preenchimento do molde, rasa-se a sua superfície superior com uma colher de pedreiro (ver fig. 5.15);
- 4) Limpam-se todos os desperdícios de argamassa que possam estar depositados na superfície da mesa de consistência e a água que escoou através da base do molde;
- 5) Retira-se cuidadosamente o molde;
- 6) Roda-se a manivela da mesa e provocam-se 15 pancadas em 15 s (ver fig. 5.16);
- 7) Após o espalhamento, medem-se com uma craveira os afastamentos entre pontos opostos da linha de contorno da argamassa segundo 4 eixos gravados no tampo da mesa (ver fig. 5.17);
- 8) Determina-se o espalhamento em percentagem através da fórmula 5.3;
- 9) O procedimento descrito é realizado 3 vezes consecutivas, obtendo-se posteriormente o valor médio.

$$\text{Espalhamento} = \frac{d - 10}{10} \times 100 \quad (5.3)$$

Em que:

d é a média dos 4 afastamentos medidos em cm

O valor 10 corresponde ao diâmetro interior da base do molde tronco-cônico em cm



Fig. 5.12 – Preenchimento do molde com argamassa fresca



Fig. 5.13 – Compactação da 1ª camada de argamassa



Fig. 5.14 – Compactação da 2ª camada de argamassa



Fig. 5.15 – Nivelamento da superfície superior do molde



Fig. 5.16 – Rotação da manivela da mesa provocando 15 pancadas, uma por segundo



Fig. 5.17 – Medição dos 4 afastamentos após o espalhamento

3 – Compactação, moldagem, desmoldagem e acondicionamento dos provetes nos ambientes de cura:

- 1) Após a determinação da consistência da argamassa fresca, coloca-se o molde para provetes prismáticos bem fixo no compactador mecânico e procede-se ao seu enchimento através de duas camadas com igual espessura (ver figs. 5.18 e 5.19);
- 2) Compacta-se cada uma das camadas com 20 pancadas;
- 3) Retira-se o molde do compactador mecânico e procede-se ao nivelamento da sua superfície superior com uma colher de pedreiro, retirando o excesso de argamassa (ver figs. 5.20 e 5.21);
- 4) Colocam-se os moldes preenchidos com argamassa num ambiente caracterizado por 20 °C de temperatura e 65% de humidade relativa durante um período de 7 dias;
- 5) Após este período procede-se à desmoldagem de todos os provetes e à sua identificação;
- 6) Colocam-se os provetes nos ambientes de cura inicialmente estipulados. Do lote total, 24 provetes permaneceram no ambiente de cura inicial e os restantes 48 provetes foram divididos em 2 lotes com igual número e armazenados em câmaras climáticas com ambientes controlados, caracterizados pela temperatura de 20 °C e humidades relativas de 50% e 95% (ver figs. 5.22, 5.23, 5.24, 5.25,

5.26 e 5.27). Deve-se ter o cuidado de colocar os provetes sobre apoios que permitam que a sua superfície inferior esteja em contacto com o ar.

Os períodos de cura que antecederam os ensaios previstos foram os seguintes:

- 2 meses e 10 dias para os provetes de cal aérea;
- 1 mês e 25 dias para os provetes de cal hidráulica.



Fig. 5.18 – Compactador mecânico para provetes



Fig. 5.19 – Enchimento do molde em 2 camadas



Fig. 5.20 – Nivelamento da superfície superior do molde



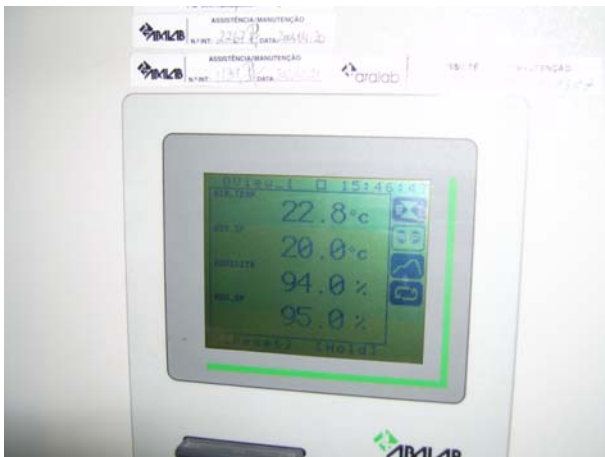
Fig. 5.21 – Molde com 3 provetes prismáticos, devidamente rasado e pronto para ser acondicionado no respectivo ambiente de cura



Figs. 5.22 e 5.23 – Compartimento com ambiente de cura de 20°C de temperatura e 65% HR



Figs. 5.24 e 5.25 – Câmara climática com ambiente de cura de 20°C de temperatura e 50% HR



Figs. 5.26 e 5.27 - Câmara climática com ambiente de cura de 20°C de temperatura e 95% HR

5.4.1.3 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi o primeiro ensaio realizado após o período de cura dos provetes. O procedimento efectuado baseou-se na ficha de ensaio Fe 08 (UNL/DEC) [73] que se destina à determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da medição da frequência de ressonância longitudinal do provete a ensaiar. O módulo de elasticidade ou módulo de Young é uma medida da rigidez dos materiais sólidos e caracteriza-se pela inclinação da tangente à curva tensões-deformações relativa a esforços provocados por cargas com grande velocidade de aplicação.

Procedimento:

- 1) Colocam-se todos os provetes a ensaiar numa estufa ventilada com 60 ± 5 °C de temperatura até atingirem massa constante. Considera-se que a massa constante é atingida quando a variação entre duas pesagens espaçadas de 24 horas é menor ou igual a 0,1 % da massa total do provete;
- 2) Determina-se a massa do provete a ensaiar e insere-se este dado, em gramas, no software de cálculo do equipamento que regista as frequências longitudinais;
- 3) Coloca-se o provete sobre um suporte adequado no equipamento “ZEUS Resonance Meter”, ajustando às suas extremidades a fonte emissora e a unidade de recepção (ver figs. 5.28 e 5.29);
- 4) Acciona-se o oscilador de frequência variável que alimenta o vibrador e determina-se a frequência de ressonância fundamental longitudinal que corresponde à frequência mais baixa para a qual se obtém uma amplitude máxima;
- 5) Roda-se o provete segundo os seus eixos longitudinal e transversal e efectua-se nova determinação;
- 6) A partir dos dois valores de frequência de ressonância longitudinal obtidos, o software de cálculo incorporado no equipamento determina os valores de módulo de elasticidade dinâmico (E) em MPa de acordo com a seguinte expressão:

$$E = (2 \times l \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad (5.4)$$

Em que:

l é o comprimento do provete [m]

f_0 é a frequência de ressonância longitudinal [Hz]

ρ é a massa volúmica do provete [N/m^3]

g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$)

- 7) Registam-se os dois valores de módulo de elasticidade dinâmico obtidos para cada provete e obtêm-se o valor médio e o desvio padrão para cada um dos lotes ensaiados;
- 8) No final do ensaio todos os provetes foram novamente colocados na estufa ventilada com temperatura de $60 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.



Fig. 5.28 – Equipamento utilizado para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico



Fig. 5.29 – Provette colocado no suporte do equipamento

5.4.1.4 Determinação da resistência à tracção por flexão e à compressão

Após a determinação do módulo de elasticidade dinâmico para a totalidade dos provetes obteve-se a resistência à tracção por flexão e à compressão dos provetes 4, 5 e 6 de cada lote. O ensaio realizado baseou-se na ficha de ensaio Fe 27 (UNL/DEC) [77] e nas normas EN 1015-11:1999/A1:2006 [27] e ASTM C 109/C 109M [2]. Na fase de planeamento estipulou-se que se iriam determinar as resistências mecânicas de acordo com as velocidades de carregamento mencionadas nas normas EN 1015-11 e ASTM C 109/C 109M. Porém, devido à impossibilidade de ajustar a máquina universal de

tracção utilizada para as velocidades especificadas, aplicaram-se as preconizadas pela ficha de ensaio Fe 27. Apesar da alteração à velocidade de carga na determinação da resistência à tracção por flexão, o intervalo de tempo desde o início da aplicação da carga até à rotura dos provetes esteve, em todos os ensaios, compreendido entre os 30 s e os 90 s, tal como estipulado na norma EN 1015-11.

Procedimento:

1 – Determinação da resistência à tracção por flexão:

- 1) Retiram-se os provetes prismáticos de dimensões 4x4x16 cm³ da estufa ventilada à temperatura de 60 ± 5 °C;
- 2) Coloca-se o suporte para ensaios de flexão na máquina universal de tracção (ver fig. 5.30);
- 3) Posiciona-se o provete sobre o suporte para ensaios de flexão de forma a que as superfícies que transmitem a carga estabeleçam contacto com as faces de moldagem. Os apoios em que o provete assenta distam de 100 mm entre si (ver fig. 5.31);
- 4) Aplica-se uma carga a meio vão a uma velocidade de 5,1 mm/min até à rotura do provete;
- 5) Registam-se a força F_f em N para a qual o provete atinge a rotura e a duração do ensaio em segundos. Ambos os valores mencionados são automaticamente determinados pelo software que interage com a máquina universal de tracção;
- 6) Calcula-se a resistência à tracção por flexão R_t em MPa através da seguinte expressão:

$$R_t = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (5.5)$$

Em que:

F_f é a força máxima aplicada no ensaio para a qual o provete atinge a rotura [N]

l consiste na distância entre os pontos de apoio onde assenta o provete (100 mm)

b é o lado da secção quadrada do prisma (40 mm)

- 7) Repete-se o procedimento mencionado nos 4 pontos anteriores para os restantes provetes. Antes da realização de um novo ensaio deve-se limpar cuidadosamente as superfícies que transmitem a carga ao provete para que as partículas soltas que eventualmente existam não comprometam a veracidade dos resultados;
- 8) Obtêm-se o valor médio e o desvio padrão para cada um dos lotes ensaiados;
- 9) No final do ensaio, os meios prismas resultantes são acondicionados na estufa ventilada à temperatura de 60 ± 5 °C até se realizar o ensaio de determinação da resistência à compressão.



Fig. 5.30 – Máquina universal de tracção

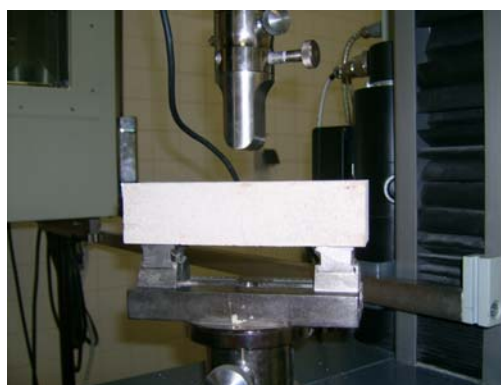


Fig. 5.31 – Provete colocado sobre o suporte para ensaios de flexão

2 – Determinação da resistência à compressão:

- 1) Retiram-se os meios prismas resultantes do ensaio de tracção por flexão da estufa ventilada à temperatura de 60 ± 5 °C;
- 2) Coloca-se o suporte para ensaios de compressão na máquina universal de tracção;
- 3) Posiciona-se o meio prisma num dispositivo de compressão que assegure uma área de contacto com as faces de moldagem de 1600 mm^2 (ver fig. 5.32);
- 4) Aplica-se uma carga que aumenta uniformemente à velocidade de $5,25 \text{ mm/min}$ até à rotura do provete (ver fig. 5.33);
- 5) Regista-se o valor da força máxima F_c em N para a qual o provete atinge a rotura por compressão. O valor mencionado é automaticamente determinado pelo software que interage com a máquina universal de tracção;
- 6) Determina-se a resistência à compressão R_c em MPa através da seguinte expressão:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (5.6)$$

Em que:

F_c consiste na força de rotura do provete à compressão [N]

A é a área de aplicação da carga (1600 mm^2)

- 7) Repete-se o procedimento mencionado nos 4 pontos anteriores para os restantes provetes. Antes da realização de um novo ensaio deve-se limpar cuidadosamente as superfícies que transmitem a carga ao provete para que as partículas soltas que eventualmente existam não comprometam a veracidade dos resultados;
- 8) Obtêm-se o valor médio e o desvio padrão para cada um dos lotes ensaiados;
- 9) Do ensaio de cada meio prisma resultam 3 amostras. As duas amostras das extremidades são armazenadas numa estufa ventilada à temperatura de $60 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ para a posterior determinação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta (ver fig. 5.34).



Fig. 5.32 – Meio prisma colocado no suporte para ensaios de compressão



Fig. 5.33 – Aspecto do provete após atingir a rotura por compressão



Fig. 5.34 – 3 amostras resultantes de cada meio prisma ensaiado

5.4.1.5 Determinação da absorção de água por capilaridade

Na determinação da absorção de água por capilaridade foram utilizados os provetes 1, 2 e 3 de cada um dos lotes de 6. O ensaio realizou-se segundo as directrizes da ficha de ensaio Fe 06 (UNL/DEC) [71], que se destina a determinar as massas de água absorvidas por capilaridade pelo provete quando a sua base se encontra em contacto com água. Foram utilizados prismas inteiros de dimensões $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ e os intervalos de tempo definidos para a determinação das massas numa fase inicial do ensaio foram mais curtos do que os mencionados na ficha de ensaio Fe 06 (UNL/DEC), com o objectivo de estabelecer uma relação mais precisa da quantidade de água absorvida em função do tempo.

Procedimento:

- 1) Retiram-se os provetes a ensaiar da estufa ventilada à temperatura de $60 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 2) Determina-se a massa seca dos provetes m_1 ;
- 3) Coloca-se um tabuleiro metálico no interior de uma caixa plástica estanque sobre apoios que impedem que este contacte com a água que está depositada na base da caixa. A água existente deve ser em quantidade suficiente para criar um ambiente saturado mas não deve contactar com a base do tabuleiro metálico;
- 4) Cobre-se a base do tabuleiro com papel absorvente e adiciona-se uma lâmina de água com 2 mm de espessura;
- 5) Colocam-se os provetes no tabuleiro apoiados numa das faces de menor área e fecha-se a tampa da caixa (ver fig. 5.35);

- 6) Após intervalos de tempo preestabelecidos determina-se a massa dos provetes m_2 . A contagem do tempo iniciou-se assim que se colocou o primeiro provete no tabuleiro. A partir desse momento realizaram-se pesagens aos 5, 10, 15, 30, 60 e 180 minutos e após esse período inicial de 24 em 24 horas aproximadamente. Deve-se ter o cuidado de deixar escorrer uma gota de água da base do provete antes de se determinar a sua massa (ver figs. 5.36 e 5.37);
- 7) Depois de cada série de pesagens adiciona-se mais água à base do tabuleiro, caso seja necessário para manter os 2 mm de altura de água, e tapa-se novamente a caixa;
- 8) Calcula-se a quantidade de água absorvida por unidade de superfície imersa m_i em kg/m^2 através da expressão 5.7:

$$m_i = \frac{m_2 - m_1}{S} \quad (5.7)$$

Em que:

m_1 é a massa do provete seco [kg]

m_2 é a massa do provete após ter decorrido o intervalo de tempo estabelecido [kg]

S consiste na área da face em contacto com a água [m^2]

- 9) Com os valores determinados traça-se um gráfico representativo da variação de massa por unidade de superfície imersa em kg/m^2 em função da raiz quadrada do tempo em segundos;
- 10) O ensaio termina quando o incremento de massa por unidade de superfície em pesagens sucessivas é inferior a 1%. O último valor determinado nas ordenadas do gráfico correspondente à curva de absorção é o valor assintótico em kg/m^2 e indica a quantidade total de água absorvida pelo provete em função da superfície de contacto;
- 11) Determina-se o coeficiente de absorção por capilaridade em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$, que indica qual a velocidade de absorção nos instantes iniciais após o contacto com a água. O valor pode ser calculado obtendo-se o declive do segmento de recta no intervalo de tempo dos 0 aos 60 minutos do gráfico traçado anteriormente;

- 12) Obtêm-se o valor médio e o desvio padrão para cada um dos lotes ensaiados relativamente ao valor assintótico e ao coeficiente de absorção por capilaridade;
- 13) No final do ensaio colocam-se todos os provetes imersos em água numa caixa plástica, para posteriormente proceder à determinação do índice de secagem.



Fig. 5.35 – Provetes colocados sobre o tabuleiro metálico, com a sua base em contacto com a lâmina de água com 2 mm de espessura

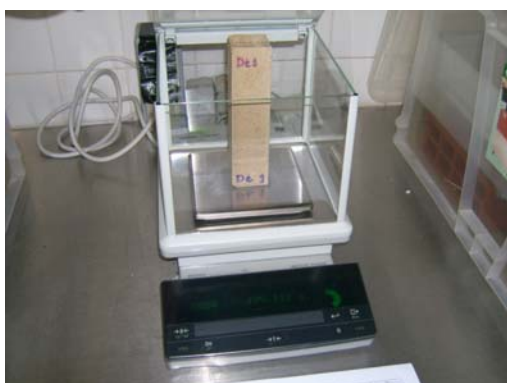


Fig. 5.36 – Determinação da massa de um provete numa balança com precisão de 0,001g após período de tempo estabelecido



Fig. 5.37 – Disposição da estrutura de ensaio entre cada período de pesagens

5.4.1.6 Determinação do Índice de secagem

A determinação do índice de secagem efectuou-se na sequência do ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade e utilizaram-se os mesmos provetes em ambos os ensaios. O procedimento descrito na ficha de ensaio Fe 07 (UNL/DEC) [72] serviu de base para o ensaio efectuado. Para obter o traçado das curvas de evaporação e o índice de secagem foi necessário monitorizar as perdas de massa dos provetes por efeito de secagem em função do tempo. O índice de secagem caracteriza-se

como sendo a relação entre o integral da curva de evaporação e o produto do teor de água inicial pelo tempo final do ensaio.

Procedimento:

- 1) Mantêm-se os provetes imersos em água até atingirem massa constante. Considera-se que a massa constante é atingida quando a variação entre duas pesagens espaçadas de 24 horas é menor ou igual a 0,1% da massa total do provete. Foi notória a formação de uma fina camada de material sólido à superfície da água, que se julga ser constituída por partículas de carbonato de cálcio (ver figs. 5.38 e 5.39);
- 2) Retiram-se os provetes da caixa cheia de água e envolvem-se numa toalha ensopada em água;
- 3) Determina-se a massa inicial m_0 em gramas dos provetes saturados de água e colocam-se numa caixa com uma rede de borracha na sua base para favorecer a evaporação através de todas as suas superfícies expostas. Os provetes são mantidos num compartimento com ambiente controlado com 20°C de temperatura e 65% de humidade relativa ao longo de todo o ensaio. Improvisou-se uma protecção em cartão para evitar que a ventilação do compartimento acelerasse a secagem dos provetes (ver fig. 5.40);
- 4) Procedem-se a novas determinações da massa dos provetes m_i em gramas após intervalos de tempo estipulados t_i em horas. A contagem do tempo de ensaio iniciou-se no momento em que se colocou o primeiro provete na caixa de evaporação após a imersão em água. As determinações de massa realizaram-se de 5 em 5 minutos na 1ª hora, de 20 em 20 minutos nas duas horas seguintes, de uma em uma hora durante as 24 horas subsequentes (durante o período diurno) e posteriormente de 12 em 12 horas até ao final do ensaio. Considerou-se que a secagem estava completa quando se registou um aumento de massa nos 3 provetes de cada série, entre diferentes pesagens;
- 5) Para cada uma das determinações de massa efectuadas no intervalo de tempo t_i calcula-se o respectivo teor de água Q_i em percentagem através da seguinte expressão:

$$Q_i = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (5.8)$$

Em que:

m_i é a massa determinada após um intervalo de tempo estipulado [g]

m_s é a massa seca dos provetes obtida no ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade após a secagem em estufa [g]

- 6) Com os valores obtidos traçam-se as curvas de evaporação, correspondentes à variação do teor de água em função do tempo. No gráfico elaborado o tempo em horas apresenta-se em abcissas e os valores de Q_i correspondentes em percentagem nas ordenadas;
- 7) Calcula-se o integral da curva de evaporação através da seguinte expressão de acordo com o Método dos Trapézios:

$$\int_{t_0}^{t_f} f(Q_i) \times dt = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(Q_i + Q_{i-1})}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \right] \quad (5.9)$$

Em que:

$\int_{t_0}^{t_f} f(Q_i) \times dt$ é o integral da curva de evaporação

t_i é o tempo de ensaio no instante “i” [horas]

Q_i é o teor de água no instante t_i [%]

n é o número de intervalos utilizados para efeito de cálculo

- 8) Determina-se o índice de secagem através da expressão 5.10:

$$I_s = \frac{\int_{t_0}^{t_f} f(Q_i) \times dt}{Q_0 \times t_f} \quad (5.10)$$

Em que:

Q_0 é o teor de água inicial [%]

t_f é o tempo final do ensaio [horas]

- 9) Calcula-se a quantidade máxima de água absorvida em gramas, subtraindo à massa dos provetes saturados de água m_0 a massa seca m_s ;
- 10) Determina-se a capacidade de absorção de água em percentagem correspondente ao valor Q_0 , ou seja, ao teor de água no momento t_0 ;
- 11) Obtêm-se o valor médio e o desvio padrão para cada um dos lotes ensaiados relativamente ao índice de secagem, à quantidade máxima de água absorvida e à capacidade de absorção de água;
- 12) No final do processo de secagem armazenam-se todos os provetes em prateleiras metálicas no compartimento com ambiente controlado onde se realizou o ensaio.



Fig. 5.38 – Aspecto dos provetes logo após a sua imersão em água



Fig. 5.39 – Aspecto dos provetes 17 dias após a sua imersão em água



Fig. 5.40 – Caixas onde se acondicionaram os provetes ao longo do processo de evaporação

5.4.1.7 Determinação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta

A massa volúmica aparente e a porosidade aberta das argamassas em estudo foram determinadas segundo as fichas de ensaio Fe 01 (UNL/DEC) [69] e Fe 02 (UNL/DEC) [70]. Ambas as determinações foram efectuadas de acordo com o método

da pesagem hidrostática. As amostras resultantes da rotura dos meios prismas por compressão serviram de provetes para este ensaio específico.

Procedimento:

- 1) Retira-se a totalidade dos provetes da estufa ventilada com uma temperatura de 60 ± 5 °C após terem atingido massa constante;
- 2) Determina-se a massa seca m_1 dos provetes numa balança com precisão de 0,001 g e colocam-se num exsicador;
- 3) Liga-se a bomba de vácuo que está acoplada ao exsicador de forma a reduzir gradualmente a pressão até 2667 Pa e mantém-se essa pressão durante 24 horas;
- 4) Após o período de 24 horas, faz-se penetrar lentamente água no exsicador até à imersão total dos provetes. A operação deve demorar pelo menos 15 minutos e quando o nível de água está a transpor os provetes o caudal que aflui ao exsicador deve ser reduzido para não criar turbulência que proporcione perdas de massa nos provetes (ver fig. 5.41);
- 5) Mantêm-se os provetes totalmente imersos durante 24 horas à pressão referida anteriormente (ver fig. 5.42);
- 6) Passado o período de 24 horas estipulado, desliga-se a bomba de vácuo, desvia-se ligeiramente a tampa do exsicador para que se restabeleça a pressão atmosférica e mantêm-se os provetes imersos durante mais 24 horas (ver fig. 5.43);
- 7) Após o período determinado procede-se à pesagem em imersão m_2 dos provetes (pesagem hidrostática). Os provetes são imersos num cesto com água e colocados num suporte suspenso na parte inferior da balança (ver figs. 5.44 e 5.45);
- 8) Retiram-se os provetes da água, envolvem-se num pano húmido para retirar o excesso de água e procede-se à determinação da massa m_3 dos provetes saturados (ver figs. 5.46 e 5.47);
- 9) Calcula-se a massa volúmica aparente MV_{ap} em kg/m^3 através da seguinte expressão:

$$MV_{ap} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3 \quad (5.11)$$

Em que:

m_1 é a massa seca dos provetes, determinada logo após serem retirados da estufa ventilada [g]

m_2 consiste na massa resultante da pesagem hidrostática [g]

m_3 é a massa dos provetes saturados de água [g]

10) Determina-se a porosidade aberta P_{ab} em percentagem de acordo com a seguinte expressão:

$$P_{ab} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \quad (5.12)$$

11) Obtêm-se o valor médio e o desvio padrão para cada um dos lotes ensaiados relativamente à massa volúmica aparente e à porosidade aberta;

12) No final do ensaio os provetes foram armazenados num compartimento com ambiente controlado com 20 °C de temperatura e 65 % de humidade relativa.



Fig. 5.41 – Operação de imersão dos provetes com recurso a um funil de vidro imerso num recipiente cheio de água e ligado ao exsiccador através de um tubo flexível



Fig. 5.42 – Exsiccador contendo os provetes imersos em água à pressão de 2667 Pa



Fig. 5.43 – Provete imersos em água à pressão atmosférica



Fig. 5.44 – Esquema de ensaio para a pesagem hidrostática



Fig. 5.45 – Pesagem do provete em imersão (pesagem hidrostática)



Fig. 5.46 – Operação para remover o excesso de água depositada nas superfícies expostas do provete



Fig. 5.47 – Determinação da massa do provete saturado

5.5 Resultados obtidos

Os resultados apresentam-se em valores médios, seguidos do desvio padrão obtido para cada um dos lotes ensaiados.

5.5.1 Baridade

Os dados referentes à determinação da baridade das matérias-primas utilizadas (agregados e ligantes) estão presentes no quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Baridade das matérias-primas

Matérias-primas	Baridade (g/cm ³)	Volume do recipiente de ensaio (cm ³)
Areia de rio	1,445 ± 0,005	3022 ± 2
Areia de areeiro	1,398 ± 0,006	
Mistura areia de rio/areia de areeiro (1:1)	1,431 ± 0,002	
Cal aérea hidratada em pó	0,361 ± 0,007	488,1
Cal hidráulica NHL5	0,852 ± 0,005	

Em todos os ensaios realizaram-se três determinações diferentes. Os valores evidenciados correspondem ao valor médio seguidos do respectivo desvio padrão. Apenas em relação ao recipiente utilizado para determinar as baridades dos ligantes não foi necessário avaliar o seu volume, visto que este valor se encontrava tabelado no laboratório. As areias utilizadas apresentam baridades bastante semelhantes, reflectindo-se na baridade da mistura, com um valor muito próximo de ambas. Relativamente aos ligantes, observa-se que a cal hidráulica têm uma baridade 2,4 vezes superior à da cal aérea. Tendo em conta que a massa volúmica da cal hidráulica ($\pm 2,73 \text{ g/cm}^3$) é pouco superior à da cal aérea hidratada em pó ($\pm 2,23 \text{ g/cm}^3$) e analisando os resultados das suas baridades, pode-se concluir que a cal hidráulica é o ligante com menor volume de vazios e, conseqüentemente, com maior compactidade. Os valores de massa volúmica dos ligantes foram retirados de Guerreiro [37], visto que são relativos ao mesmo tipo de ligantes e inclusivamente da mesma marca.

5.5.2 Consistência por espalhamento

Nas 4 amassaduras realizadas procurou-se obter um espalhamento compreendido no intervalo entre 70% a 75%. Em cada determinação realizaram-se 3 ensaios consecutivos. Sempre que, pelo menos em um dos ensaios, o valor de espalhamento

estava de acordo com o intervalo estipulado, a argamassa foi considerada como adequada e procedeu-se à respectiva moldagem. Este critério teve em consideração o facto de o intervalo estabelecido ser bastante reduzido e a rápida diminuição de trabalhabilidade das argamassas de cal hidráulica nos instantes que se sucedem à amassadura. Os dados relativos à consistência das argamassas, as relações entre a água da amassadura e a massa do ligante seco e as quantidades dos constituintes empregues em cada mistura apresentam-se no quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Consistência por espalhamento, relações água/ligante e quantidades empregues na mistura

Tipo de argamassa	Argamassa de cal aérea								Argamassa de cal hidráulica							
Processo de mistura	EN 1015-2				ASTM C305				EN 1015-2				ASTM C305			
Traço volumétrico	1:2				1:2				1:3				1:3			
Quantidade de água (cm³)	1934				1934				2031				2031			
Massa de ligante (g)	990				990				1704				1704			
Massa de agregado (g)	7865				7865				8586				8586			
Relação água/ligante	1,95				1,95				1,19				1,19			
Espalhamento (%)	1º	2º	3º	Média	1º	2º	3º	Média	1º	2º	3º	Média	1º	2º	3º	Média
	69	70	62	67	69	73	70	71	71	64	61	65	82	78	73	78

5.5.3 Módulo de elasticidade dinâmico

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi o único ensaio realizado para a totalidade dos provetes de cada série. Posteriormente, avaliou-se a dispersão dos resultados em relação ao valor médio através do desvio padrão. A análise global dos resultados de cada série foi fundamental para decidir quais os provetes a utilizar na determinação das resistências mecânicas e na apreciação do comportamento face à água.

No quadro 5.5 figuram, para cada série, os resultados da massa e do respectivo módulo de elasticidade (E) em valores médios em relação ao conjunto de 6 provetes.

Quadro 5.5 – Módulo de elasticidade dinâmico (E)

Provetes	M	DP	E	DP
	(g)		MPa	
Aa (1 a 6)	431,3	2,9	1826	57
Ab (1 a 6)	439,0	2,4	2254	56
Ac (1 a 6)	428,1	2,2	1657	57
Ad (1 a 6)	434,7	3,9	1806	31
Ae (1 a 6)	439,4	2,5	2187	77
Af (1 a 6)	434,3	1,2	1820	87
Ha (1 a 6)	454,1	1,3	1084	71
Hb (1 a 6)	455,7	2,5	1109	48
Hc (1 a 6)	455,3	1,3	2019	157
Hd (1 a 6)	463,1	2,4	1322	49
He (1 a 6)	467,2	2,0	1459	51
Hf (1 a 6)	459,9	2,7	2048	244

5.5.4 Resistências à tracção por flexão e à compressão

Na fase preliminar destes dois ensaios foi necessário escolher quais os 3 provetes de cada lote de 6 que iriam ser testados. Com este objectivo em mente analisaram-se os resultados decorrentes da determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

Os lotes que estiveram nas câmaras climáticas com humidade relativa de 95% evidenciaram resultados com um desvio padrão bastante superior aos restantes. Ao examinar os dados com maior minúcia verificou-se que os provetes 4,5 e 6 de cada série, sujeitos a esta cura, revelaram valores superiores aos restantes, sendo que, quanto maior a sua proximidade em relação à ventoinha da câmara climática, maior o seu valor de módulo de elasticidade (em todas as séries expostas a este ambiente de cura, o provete que esteve mais distante da ventoinha foi o 1 e o mais próximo o 6). Este facto foi patente em quase todas as séries, à excepção dos provetes de cal aérea preparados através da norma EN 1015-2 (série Ac), onde o desvio padrão está em consonância com os restantes ambientes de cura e o valor de módulo de elasticidade é crescente do provete 6 para o 1.

Sendo que os provetes 4, 5 e 6 demonstraram uma tendência comum em quase todas as séries, foram seleccionados para a determinação das resistências à tracção por flexão e à compressão. Com a escolha efectuada pretende-se avaliar se esta tendência se estende a todos os ensaios mecânicos e qual o seu fundamento.

Os provetes 1,2 e 3 de cada série mantiveram-se armazenados na estufa ventilada a 60 °C para serem posteriormente utilizados na avaliação do comportamento face à água.

No quadro 5.6 apresentam-se os resultados, em valores médios, das resistências à tracção por flexão e à compressão, o desvio padrão e o período de tempo relativo ao ensaio de resistência à tracção. O intervalo de tempo compreendido entre o início da aplicação da carga até à rotura do provete por flexão é uma das especificações da norma EN 1015-11:1999/A1:2006 [27].

Quadro 5.6 – Resistências à tracção e à compressão

Provetes	Rt	DP	Δt até rotura (s)	Rc	DP
	MPa			MPa	
Aa (4 a 6)	0,29	0,02	50 ± 2	0,38	0,04
Ab (4 a 6)	0,34	0,02	55 ± 2	0,41	0,07
Ac (4 a 6)	0,26	0,00	47 ± 1	0,33	0,02
Ad (4 a 6)	0,24	0,01	47 ± 1	0,30	0,01
Ae (4 a 6)	0,28	0,01	49 ± 1	0,36	0,03
Af (4 a 6)	0,26	0,02	48 ± 2	0,33	0,04
Ha (4 a 6)	0,15	0,01	42 ± 3	0,58	0,02
Hb (4 a 6)	0,17	0,01	40 ± 2	0,63	0,03
Hc (4 a 6)	0,32	0,08	53 ± 7	0,96	0,14
Hd (4 a 6)	0,21	0,02	43 ± 2	0,63	0,05
He (4 a 6)	0,28	0,02	50 ± 2	0,66	0,03
Hf (4 a 6)	0,47	0,12	63 ± 7	1,37	0,34

5.5.5 Absorção de água por capilaridade

Os resultados referentes ao ensaio de absorção de água por capilaridade podem ser observados no quadro 5.7. Os gráficos apresentados nas figuras 5.48 e 5.49

representam a variação de massa por unidade de superfície imersa em função da raiz quadrada do tempo, nas argamassas de cal aérea e nas argamassas de cal hidráulica.

Quadro 5.7 – Coeficiente de capilaridade e valor assintótico

Provetes	Coeficiente de Capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$)	Valor Assintótico (kg/m^2)
Aa (1 a 3)	$0,235 \pm 0,013$	$39,180 \pm 0,096$
Ab (1 a 3)	$0,293 \pm 0,004$	$39,146 \pm 0,099$
Ac (1 a 3)	$0,258 \pm 0,005$	$40,108 \pm 0,009$
Ad (1 a 3)	$0,230 \pm 0,003$	$37,785 \pm 0,350$
Ae (1 a 3)	$0,268 \pm 0,004$	$38,095 \pm 0,254$
Af (1 a 3)	$0,261 \pm 0,005$	$39,173 \pm 0,214$
Ha (1 a 3)	$0,286 \pm 0,005$	$42,899 \pm 0,414$
Hb (1 a 3)	$0,298 \pm 0,009$	$41,391 \pm 0,460$
Hc (1 a 3)	$0,278 \pm 0,013$	$43,145 \pm 0,474$
Hd (1 a 3)	$0,290 \pm 0,013$	$42,577 \pm 0,477$
He (1 a 3)	$0,298 \pm 0,006$	$42,146 \pm 0,414$
Hf (1 a 3)	$0,261 \pm 0,023$	$42,099 \pm 0,205$

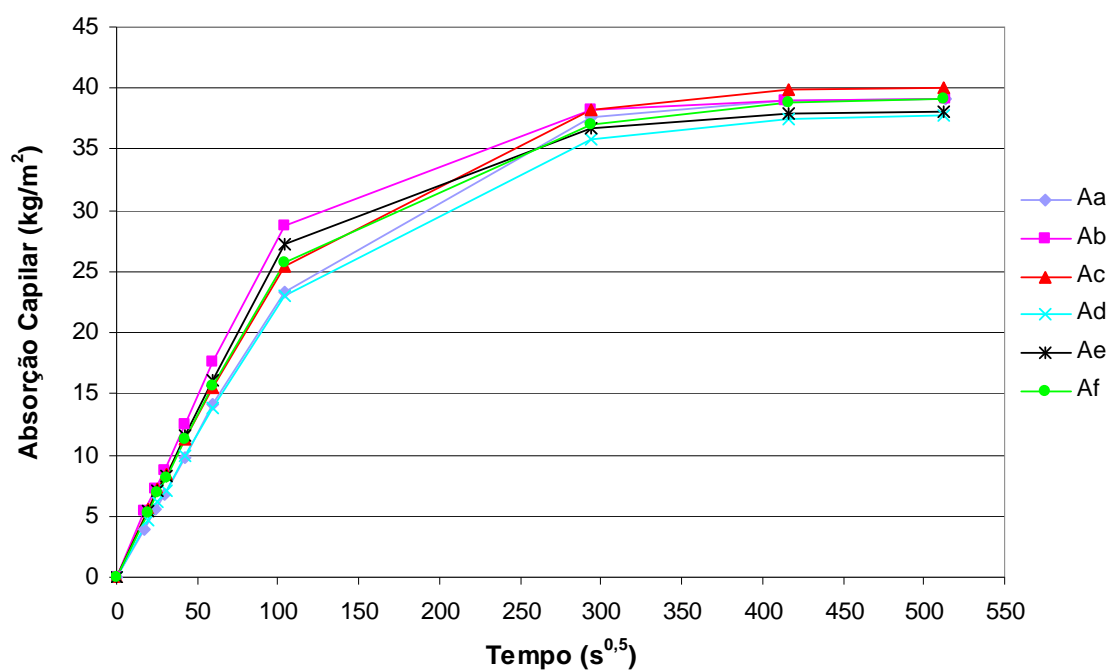


Fig. 5.48 – Absorção capilar das argamassas de cal aérea

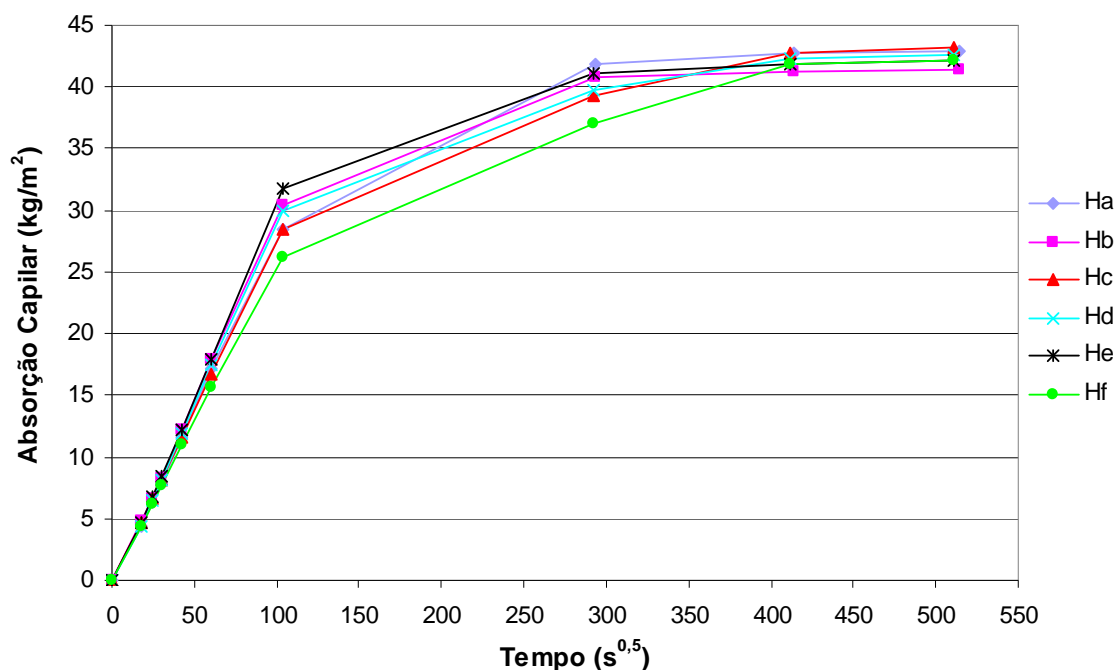


Fig. 5.49 – Absorção capilar das argamassas de cal hidráulica

O coeficiente de capilaridade foi obtido através do declive do segmento de recta correspondente às pesagens até aos 60 minutos e é expresso em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$. Quando a variação de massa registada foi inferior a 1%, num intervalo de 24 horas, o ensaio terminou e obteve-se o valor assintótico em kg/m^2 , correspondente à quantidade máxima de água absorvida por unidade de superfície imersa.

5.5.6 Índice de secagem

Após o ensaio de absorção de água por capilaridade os provetes foram imersos em água até atingirem massa constante. Posteriormente, procedeu-se à secagem das argamassas para determinar as curvas de evaporação e o índice de secagem.

O quadro 5.8 apresenta a quantidade máxima de água absorvida, a capacidade de absorção de água e o índice de secagem para cada um dos lotes em estudo. Nas figuras 5.50 e 5.51 estão patentes as curvas de evaporação das argamassas de cal aérea e das argamassas de cal hidráulica, que traduzem a variação do teor de água (em %) em função do tempo (em horas).

Quadro 5.8 – Quantidade máxima de água absorvida, capacidade de absorção de água e índice de secagem

Provetes	Quantidade máxima de água absorvida (g)	Capacidade de absorção de água (%)	Índice de Secagem
Aa (1 a 3)	65,8 ± 0,2	15,2 ± 0,1	0,40 ± 0,04
Ab (1 a 3)	65,7 ± 0,1	14,9 ± 0,1	0,37 ± 0,01
Ac (1 a 3)	66,3 ± 0,2	15,4 ± 0,1	0,41 ± 0,07
Ad (1 a 3)	62,7 ± 0,5	14,5 ± 0,1	0,38 ± 0,05
Ae (1 a 3)	63,1 ± 0,5	14,3 ± 0,1	0,35 ± 0,02
Af (1 a 3)	64,9 ± 0,4	14,9 ± 0,1	0,38 ± 0,02
Ha (1 a 3)	72,4 ± 0,6	16,0 ± 0,1	0,36 ± 0,01
Hb (1 a 3)	69,1 ± 0,6	15,2 ± 0,1	0,33 ± 0,05
Hc (1 a 3)	74,1 ± 0,8	16,3 ± 0,2	0,27 ± 0,01
Hd (1 a 3)	72,4 ± 0,8	15,7 ± 0,2	0,30 ± 0,04
He (1 a 3)	71,2 ± 0,6	15,2 ± 0,1	0,28 ± 0,02
Hf (1 a 3)	71,7 ± 0,3	15,7 ± 0,0	0,33 ± 0,01

Curvas de Evaporação

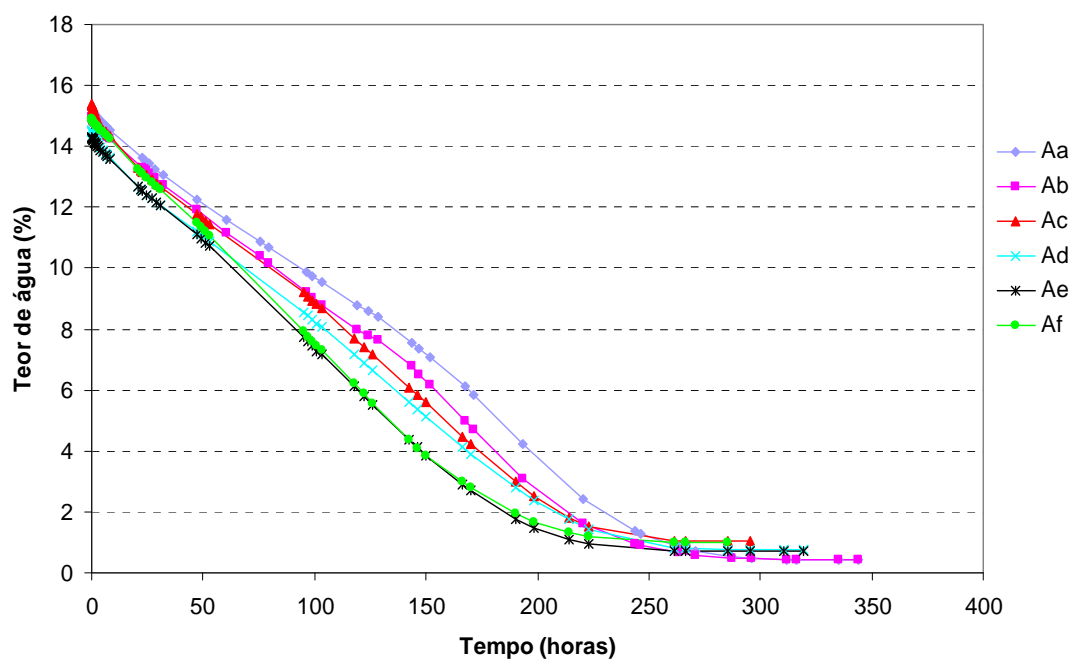


Fig. 5.50 – Variação do teor de água em função do tempo nas argamassas de cal aérea

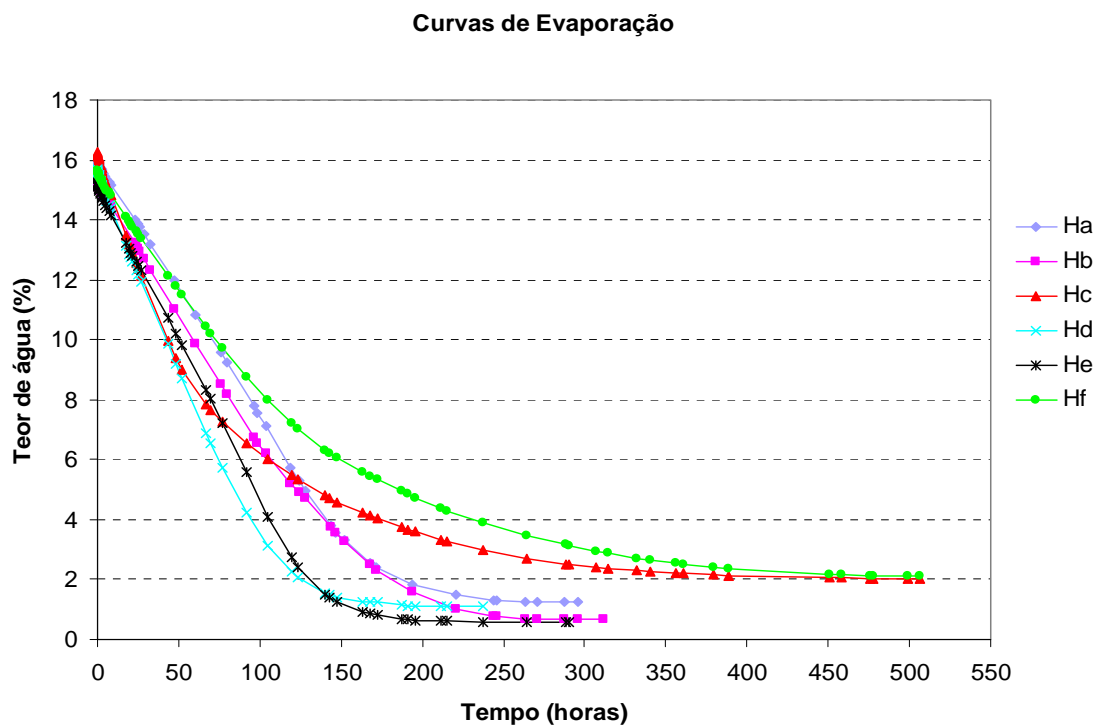


Fig. 5.51 – Variação do teor de água em função do tempo nas argamassas de cal hidráulica

As diferenças entre os períodos totais de ensaio, mais perceptíveis na figura 5.51, devem-se ao diferente comportamento face à secagem entre argamassas e ao critério utilizado no ensaio. Estipulou-se que a secagem só estava completa quando se registasse um aumento de massa nos 3 provetes de cada série, entre diferentes pesagens.

5.5.7 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

A avaliação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta foi efectuada com recurso aos provetes utilizados na determinação das resistências mecânicas. Os resultados obtidos apresentam-se no quadro 5.9.

Quadro 5.9 – Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Provetes	MVap (kg/m³)	Pab (%)
Aa (4 a 6)	1746 ± 10	33 ± 0
Ab (4 a 6)	1746 ± 11	33 ± 0
Ac (4 a 6)	1735 ± 2	33 ± 0
Ad (4 a 6)	1744 ± 13	33 ± 1
Ae (4 a 6)	1753 ± 6	33 ± 0
Af (4 a 6)	1748 ± 3	33 ± 0
Ha (4 a 6)	1804 ± 12	31 ± 1
Hb (4 a 6)	1802 ± 11	32 ± 0
Hc (4 a 6)	1783 ± 1	33 ± 0
Hd (4 a 6)	1810 ± 13	31 ± 0
He (4 a 6)	1820 ± 1	31 ± 0
Hf (4 a 6)	1812 ± 2	31 ± 0

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos foram analisados tendo em conta os seguintes parâmetros: o ligante empregue na formulação das argamassas (cal aérea hidratada em pó ou cal hidráulica NHL5), os dois processos de mistura utilizados nas amassaduras (segundo as normas EN 1015-2 e ASTM C305) e os três ambientes de cura com diferentes humidades relativas (50%, 65% e 95%).

Comparando as argamassas preparadas através de diferentes procedimentos mas curadas de forma análoga, conseguiu-se examinar a influência do processo de mistura. Procedeu-se à comparação entre argamassas preparadas segundo o mesmo processo de mistura e curadas em ambientes com diferentes humidades relativas para avaliar a influência das condições de cura. Através deste procedimento é expectável um maior escrutínio na análise dos parâmetros em estudo nesta investigação.

6.1 Caracterização das argamassas frescas

Como era expectável, as argamassas de cal aérea necessitaram de maior quantidade de água na amassadura para obterem o mesmo espalhamento que as argamassas de cal hidráulica. Nas amassaduras realizadas de acordo com a norma ASTM C305 obteve-se um maior espalhamento para ambos os tipos de argamassa, com recurso à mesma quantidade de água. Comparando os valores dos 3 ensaios de espalhamento efectuados com as argamassas de cal hidráulica constata-se que a plasticidade diminui acentuadamente desde o primeiro até ao terceiro ensaio. No trabalho experimental foi notória a rápida diminuição de trabalhabilidade das argamassas de cal hidráulica, mais concretamente na que resultou da mistura segundo a norma EN 1015-2. Em oposição, as argamassas de cal aérea demonstraram trabalhabilidade constante até ao momento da moldagem dos provetes.

6.2 Resistências mecânicas

6.2.1 Módulo de elasticidade dinâmico

No gráfico da fig. 6.1 pode-se observar que, para ambos os processos de mistura, a argamassa de cal aérea obtém valores de módulo de elasticidade mais elevados após uma cura com 65% de humidade relativa, enquanto que a argamassa de cal hidráulica atinge esses registos com 95% de humidade relativa. Contrariamente ao que seria expectável, as argamassas de cal aérea dos lotes *Ab* e *Ae* obtiveram os valores mais elevados, com 2254 e 2187 MPa. As argamassas de cal hidráulica curadas nos ambientes mais secos, 50% e 65% HR, registaram os valores mais reduzidos de módulo de elasticidade.

Os valores referentes ao desvio padrão são sempre mais elevados para os ambientes de cura de 95% de humidade relativa. A diferença em relação aos restantes lotes acentua-se no caso das argamassas de cal hidráulica.

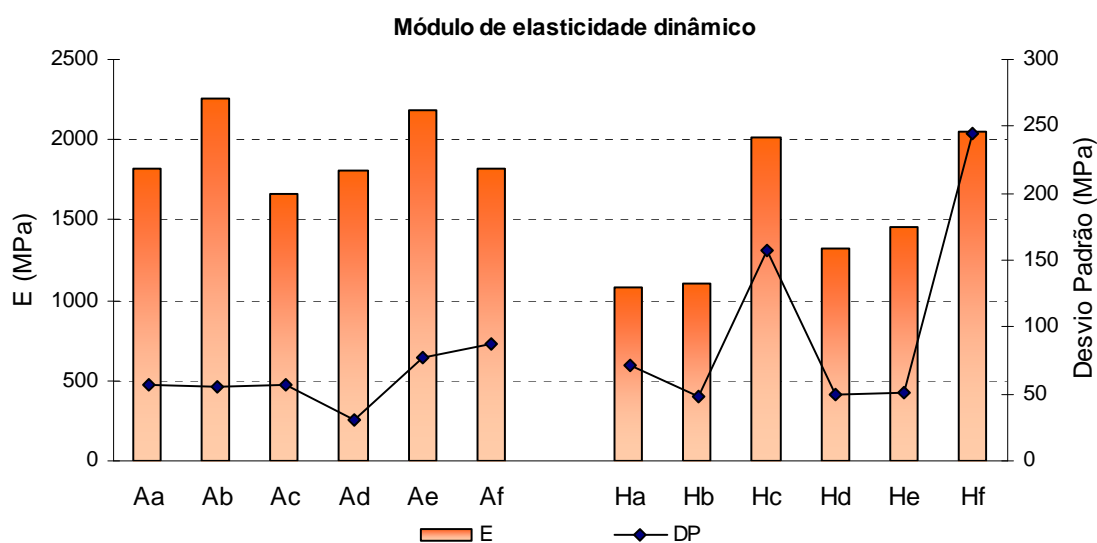


Fig. 6.1 – Módulo de elasticidade dinâmico

Através do gráfico da fig. 6.2 pode-se avaliar a influência que os processos de mistura tiveram nos resultados de módulo de elasticidade. Todas as argamassas curadas com 95% HR apresentam valores mais elevados quando misturadas segundo a norma ASTM C305. Nos lotes sujeitos a curas em ambientes mais secos, as argamassas de cal aérea registam valores mais elevados quando misturadas segundo a norma EN 1015-2, enquanto que as argamassas de cal hidráulica obtêm esses registros com a norma ASTM C305.

O processo de mistura tem maior influência nos resultados das argamassas de cal hidráulica curadas com 50% e 65% HR, obtendo-se diferenças de 22,0% e 31,6%. Nos restantes lotes as diferenças são inferiores a 10%.

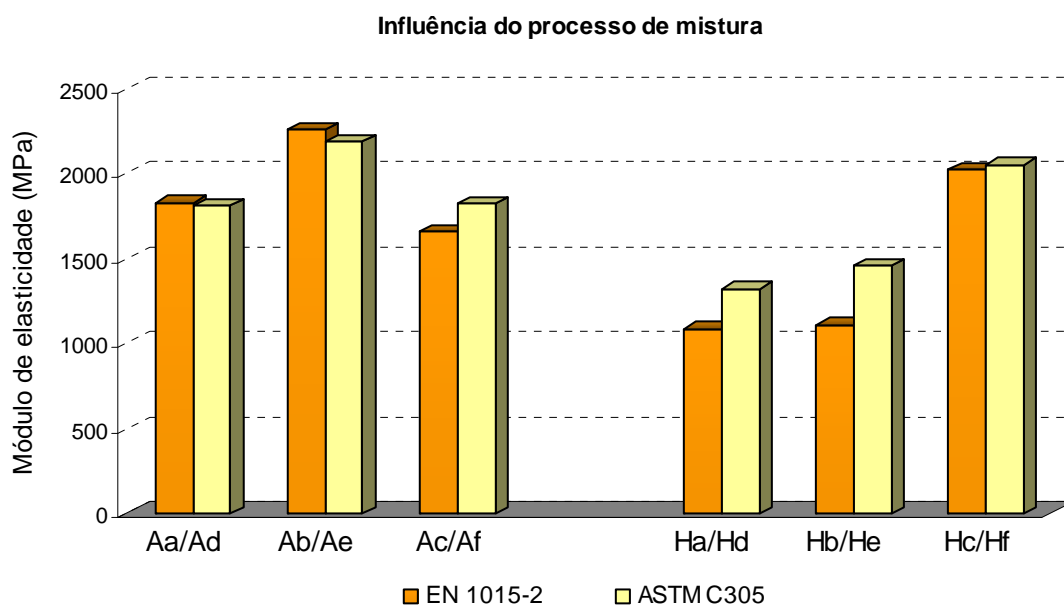


Fig. 6.2 – Influência do processo de mistura relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico

Analisando o gráfico da fig. 6.3 é perceptível que as argamassas de cal aérea atingem módulos de elasticidade mais elevados após uma cura com 65% HR. Para os restantes ambientes os valores obtidos são inferiores e bastante similares entre si, denotando-se um ligeiro decréscimo nas argamassas misturadas de acordo com a norma EN 1015-2 e curadas no ambiente mais húmido.

Nas argamassas de cal hidráulica o módulo de elasticidade aumenta proporcionalmente ao incremento da humidade relativa dos ambientes de cura. Os lotes curados nos ambientes com 95% HR apresentam aumentos significativos em relação aos expostos à cura com 50% HR, cerca de 86,3% para a norma EN 1015-2 e 54,9% para a norma ASTM C305.

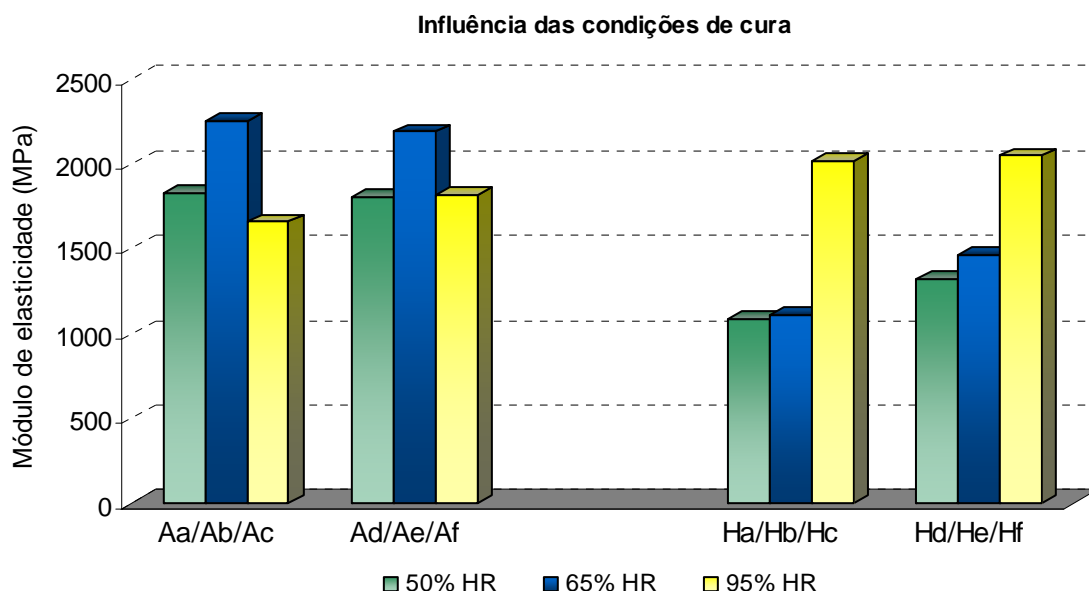


Fig. 6.3 – Influência das condições de cura relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico

6.2.2 Resistências à tracção por flexão e à compressão

Em relação aos resultados referentes à resistência à tracção por flexão, visíveis no gráfico da fig. 6.4, os valores atingidos pelas argamassas de cal aérea são superiores, em média, aos obtidos pelas argamassas de cal hidráulica. Os lotes com menor e maior resistência obtida são ambos compostos por argamassas de cal hidráulica.

No que respeita à resistência à compressão (ver gráfico da fig. 6.5), os valores obtidos pelas argamassas de cal hidráulica são superiores aos das argamassas de cal aérea em todos os lotes. As resistências mais elevadas verificam-se nas argamassas de cal hidráulica curadas com 95% HR.¹

Em ambas as resistências o desvio padrão continua invulgarmente elevado nos lotes que estiveram em ambientes com 95% HR.

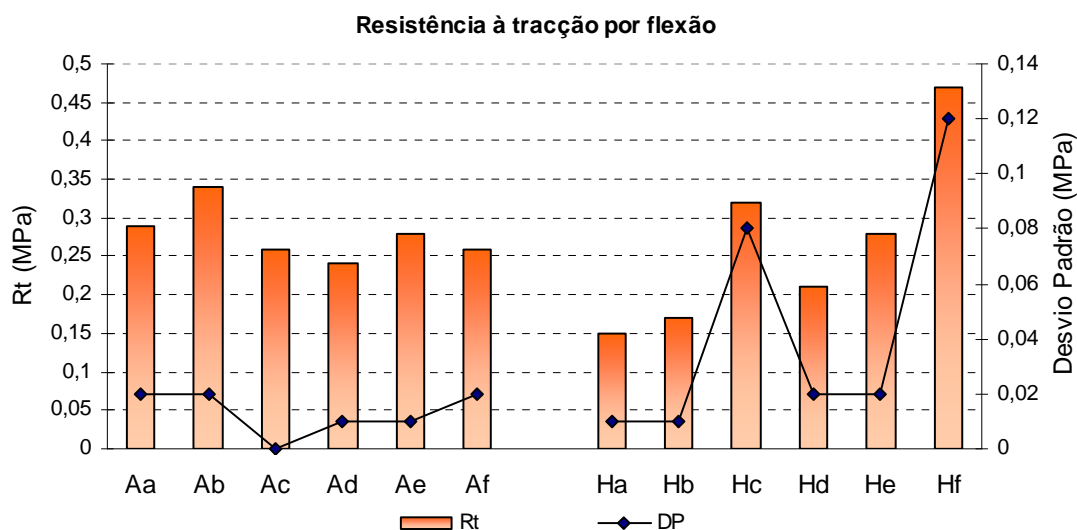


Fig. 6.4 – Resistência à tracção por flexão

¹ Foram utilizadas diferentes escalas nos gráficos das resistências à tracção por flexão e à compressão para facilitar a sua interpretação. Nos gráficos referentes à resistência à tracção por flexão a escala é de 0,05 MPa enquanto que nos relativos à resistência à compressão é de 0,2 MPa.

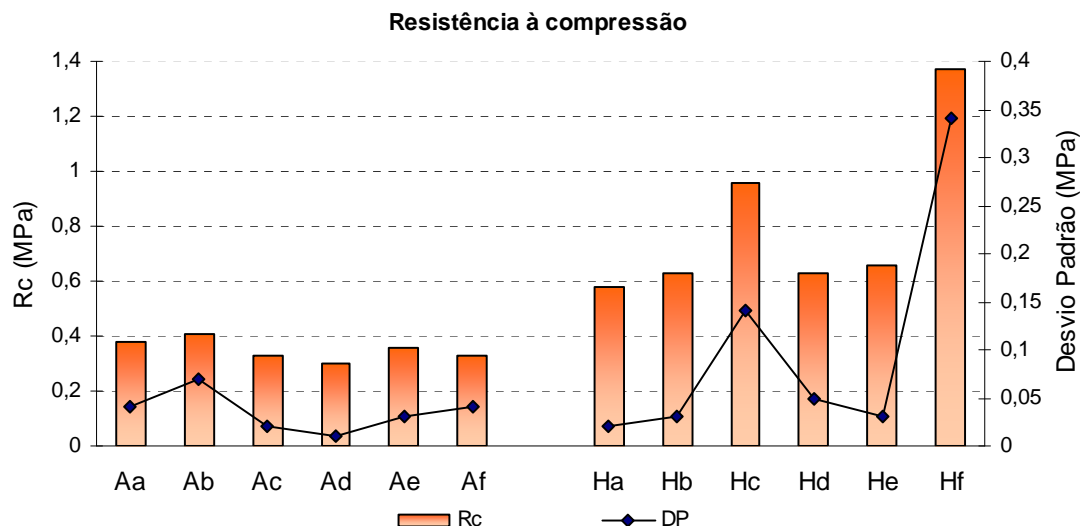


Fig. 6.5 – Resistência à compressão

Através dos gráficos das figuras 6.6 e 6.7 pode-se avaliar a influência que o processo de mistura tem nas resistências mecânicas. Os valores obtidos demonstram a mesma tendência para ambas as resistências. As argamassas de cal aérea curadas em ambientes mais secos atingem maiores resistências quando misturadas pela norma EN 1015-2. Em ambientes com 95% HR o procedimento de amassadura não tem qualquer influência, visto que os valores apresentados são exactamente iguais para ambas as normas.

As argamassas de cal hidráulica obtêm sempre maiores resistências quando misturadas segundo a norma ASTM C305, independentemente do ambiente de cura em causa. As diferenças são mais significativas na resistência à tracção, com aumentos sempre superiores a 40%. Na resistência à compressão as diferenças são mínimas nos ambientes de cura mais secos e cerca de 42,7% no ambiente com 95% HR.

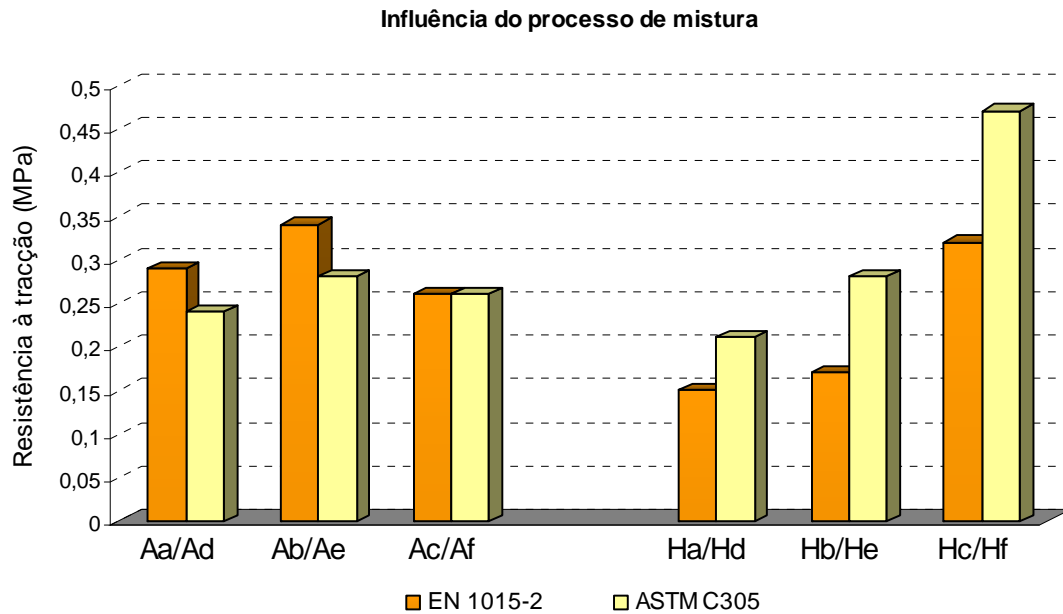


Fig. 6.6 – Influência do processo de mistura relativamente à resistência à tracção

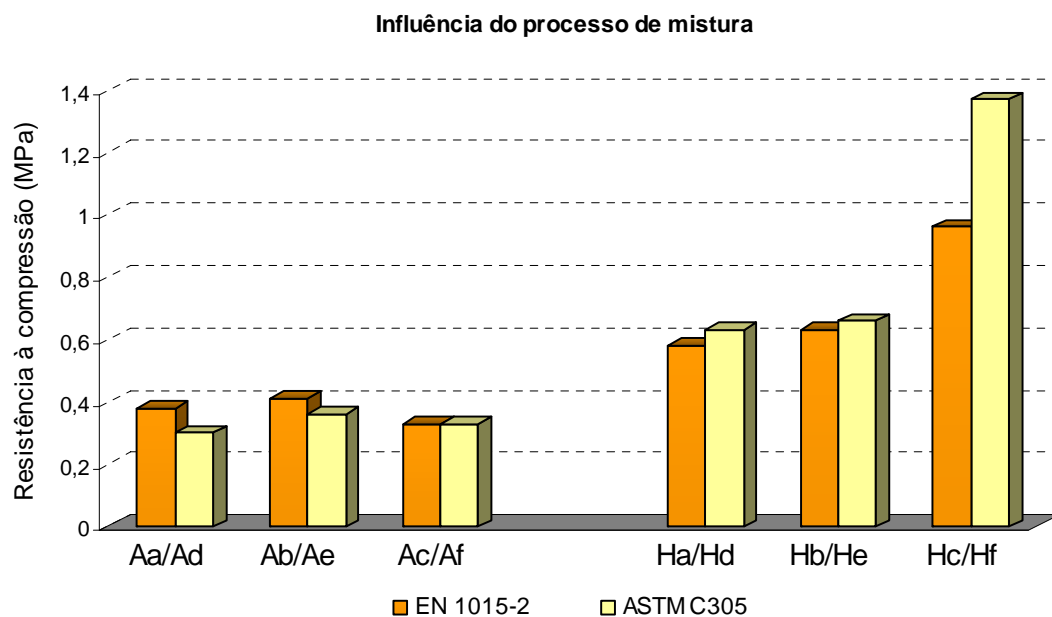


Fig. 6.7 – Influência do processo de mistura relativamente à resistência à compressão

Observando os gráficos das figuras 6.8 e 6.9 torna-se evidente que as condições de cura influenciam de forma bastante semelhante todas as resistências mecânicas em estudo. A análise efectuada para os resultados referentes ao módulo de elasticidade adequa-se aos dados apresentados nos gráficos relativos às resistências à tracção por flexão e à compressão. Porém, existem algumas diferenças que devem ser assinaladas. Nas argamassas de cal aérea as menores resistências são atingidas para o ambiente de cura com 50% HR e processo de mistura de acordo com a norma ASTM C305. No conjunto de argamassas de cal hidráulica misturadas pela norma ASTM C305, as resistências atingidas após as curas com 95% HR em relação às curas com 50% HR apresentam aumentos mais relevantes que no caso do módulo de elasticidade, 123,8% na resistência à tracção e 117,5% na resistência à compressão.

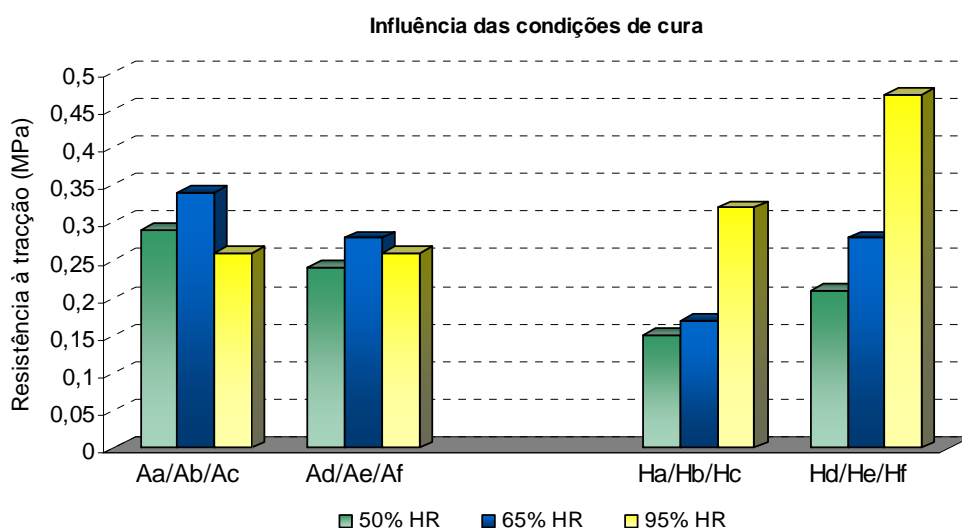


Fig. 6.8 – Influência das condições de cura relativamente à resistência à tracção

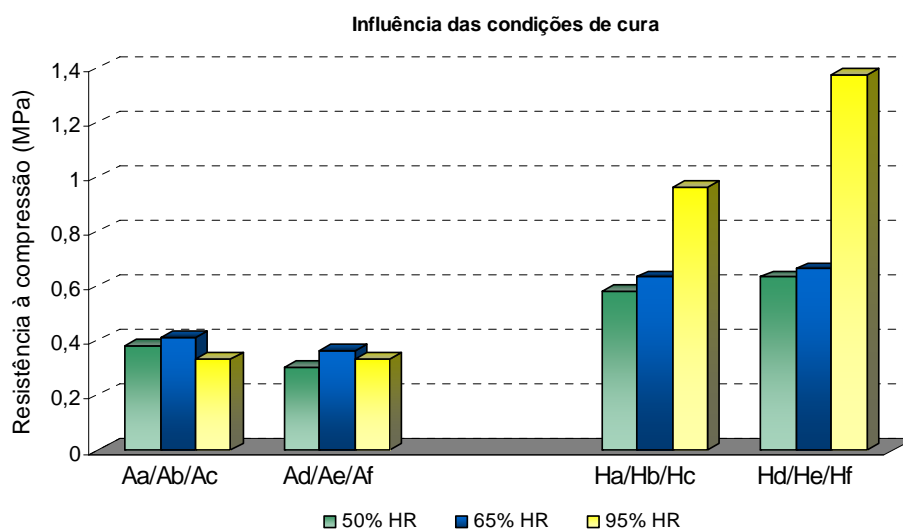


Fig. 6.9 - Influência das condições de cura relativamente à resistência à compressão

6.3 Comportamento face à água

6.3.1 Absorção de água por capilaridade

No que diz respeito ao comportamento face à água pode-se inferir que as argamassas de cal hidráulica absorvem maiores quantidades de água por capilaridade do que as argamassas de cal aérea, independentemente do processo de mistura e das condições de cura praticadas (ver fig. 6.10). Analisando o quadro 5.7 constata-se que o valor assintótico máximo apresentado pelas argamassas de cal aérea ($40,1 \text{ kg/m}^2$) é inferior ao valor assintótico mínimo evidenciado pelas argamassas de cal hidráulica ($41,4 \text{ kg/m}^2$). Apesar desta diferença, verifica-se que a velocidade com que essa absorção se processa nos instantes iniciais, retratada pelo coeficiente de capilaridade, é muito similar para ambas as argamassas, sendo que em termos médios continua a ser superior nas argamassas de cal hidráulica relativamente às de cal aérea (ver fig. 6.10). O comportamento mais desfavorável apresentado pelas argamassas de cal hidráulica pode ser explicado pela presença de uma maior quantidade de pequenos poros na sua estrutura interna, resultante das reacções de hidratação dos componentes hidráulicos [41].

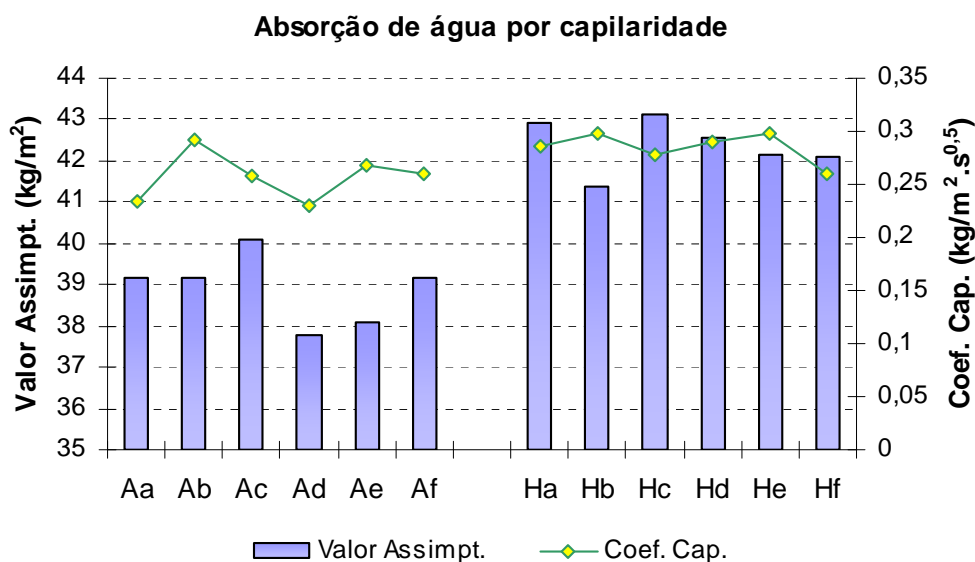


Fig. 6.10 – Absorção capilar

As argamassas em estudo absorvem maiores quantidades de água quando misturadas segundo a Norma EN 1015-2, tendo como única exceção as argamassas de cal hidráulica curadas com 65% HR (ver fig. 6.11).

Relativamente ao coeficiente de capilaridade, as argamassas preparadas segundo a Norma ASTM C305 apresentam valores superiores na cura mais húmida para o ligante aéreo e na cura mais seca para o ligante hidráulico, teoricamente nos ambientes mais desfavoráveis em ambos os casos (ver fig. 6.11).

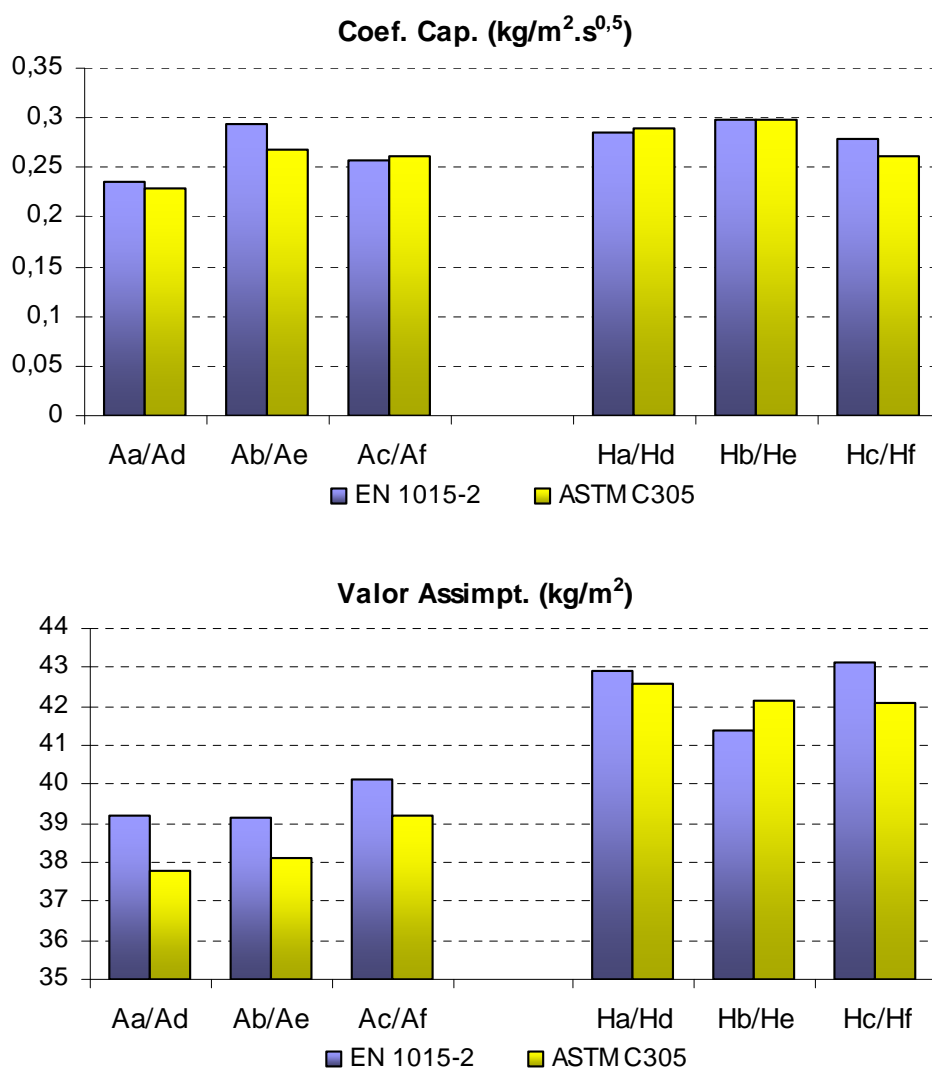


Fig. 6.11 – Influência do processo de mistura relativamente à absorção de água por capilaridade

Obtiveram-se os resultados mais elevados de valor assintótico para a humidade relativa de 95 % nas argamassas de cal aérea para ambos os processos de mistura. Nas argamassas de cal hidráulica esses valores registaram-se para as humidades relativas de 50 % e 95 % no processo de mistura segundo a Norma EN 1015-2, enquanto que na Norma ASTM C305 o valor assintótico decresceu com o aumento da humidade relativa (ver fig. 6.12).

O coeficiente de capilaridade aumenta proporcionalmente à humidade relativa do ambiente de cura até aos 65 % e diminui para valores de 95 %, independentemente do ligante e do processo de mistura utilizado (ver fig. 6.12).

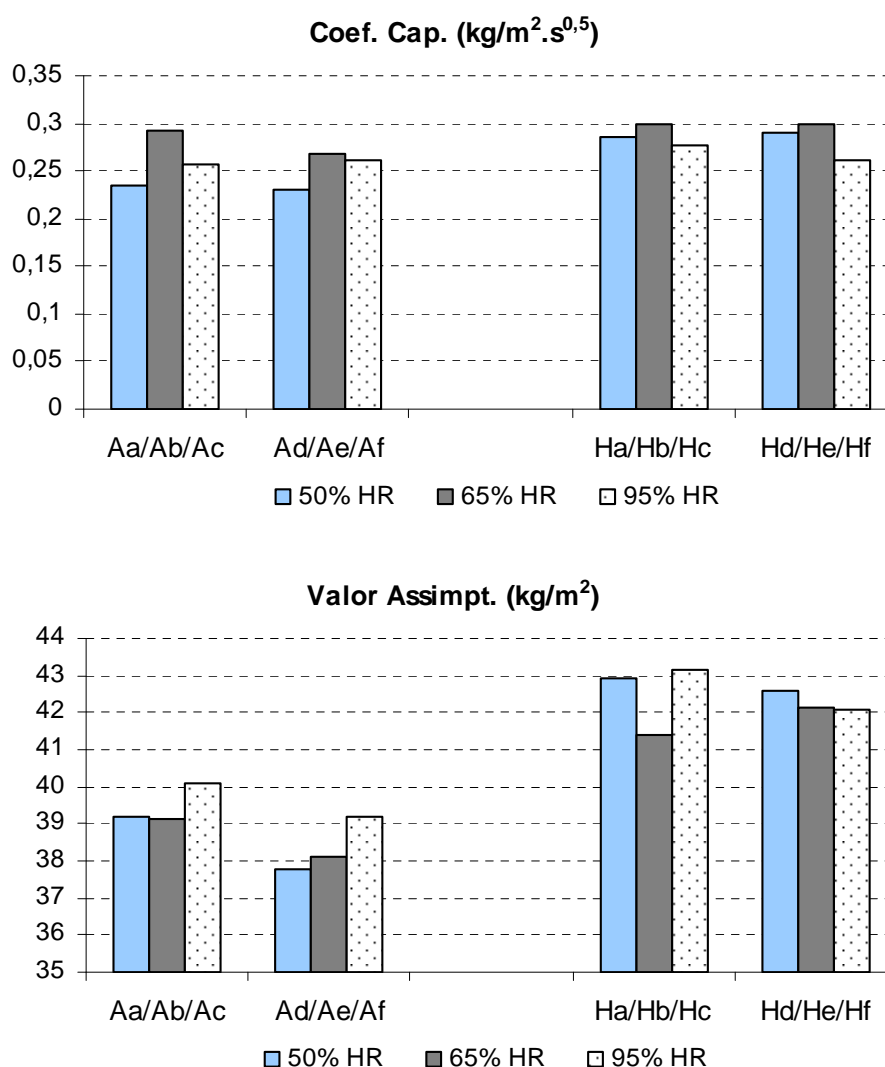


Fig. 6.12 – Influência das condições de cura relativamente à absorção de água por capilaridade

6.3.2 Índice de secagem

O índice de secagem traduz o comportamento da argamassa no processo de expulsão da humidade existente nos seus poros. Quanto maior o índice de secagem, mais expedita será a eliminação do teor de humidade. A primeira inferência que se pode tirar é que as argamassas de cal aérea apresentam maiores índices de secagem e, conseqüentemente, maior facilidade de secagem que as argamassas de cal hidráulica (ver figs. 6.13 e 6.14). Além de terem absorvido maior quantidade de água por capilaridade, as argamassas de cal hidráulica manifestaram também maior morosidade para eliminar essa humidade. As argamassas de cal hidráulica curadas em ambiente com 95% de humidade relativa prolongaram o ensaio até às 500 horas, mais 200 horas que as argamassas de cal aérea curadas nas mesmas condições (ver figs. 5.50 e 5.51).

A mistura segundo a Norma EN 1015-2 conferiu às argamassas maiores índices de secagem. O único caso em que tal não se verifica é nas argamassas de cal hidráulica curadas com 95 % HR (ver fig. 6.13). O valor assintótico relativo à absorção capilar das argamassas preparadas de acordo com esta Norma foi também elevado porém, ficou demonstrado que a humidade absorvida facilmente se dissipa por evaporação.

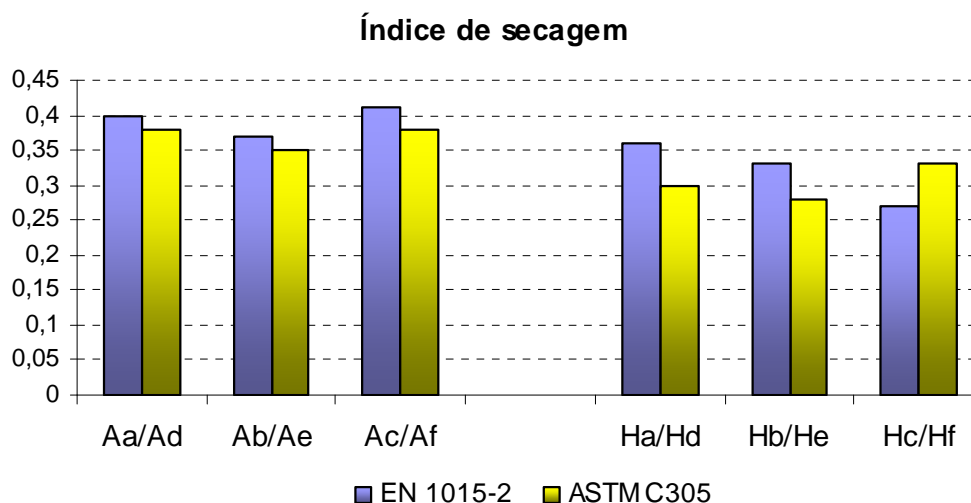


Fig. 6.13 – Influência do processo de mistura relativamente ao índice de secagem

A cura com 65 % HR apresentou os valores mais desfavoráveis em termos de índice de secagem nas argamassas de cal aérea. Para o ambiente mais seco e mais húmido os valores foram superiores e bastante similares entre si (ver fig. 6.14). Relativamente às argamassas de cal hidráulica, o índice de secagem diminuiu com o aumento da humidade relativa na Norma EN 1015-2 e na Norma ASTM C305 essa diminuição só se verificou até aos 65 % HR, visto que o valor mais elevado foi obtido para 95 % HR (ver fig. 6.14).

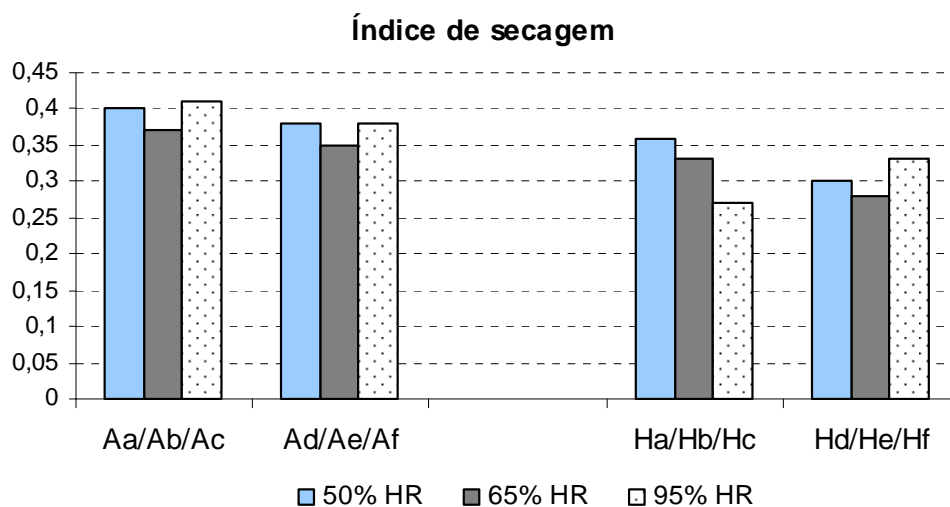


Fig. 6.14 – Influência das condições de cura relativamente ao índice de secagem

6.4 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Relativamente à massa volúmica aparente e à porosidade aberta constatou-se que as argamassas de cal hidráulica são mais compactas que as de cal aérea, apresentando valores superiores de massa volúmica aparente e menor volume de vazios. Em termos médios as argamassas de cal hidráulica obtiveram valores de $1805,2 \text{ kg/m}^3$ e $31,5 \%$ e as de cal aérea $1745,3 \text{ kg/m}^3$ e 33% , respectivamente para a massa volúmica aparente e para a porosidade aberta. No conjunto das argamassas de cal aérea a porosidade aberta manteve-se constante, independentemente do processo de mistura e das condições de cura (ver fig. 6.15).

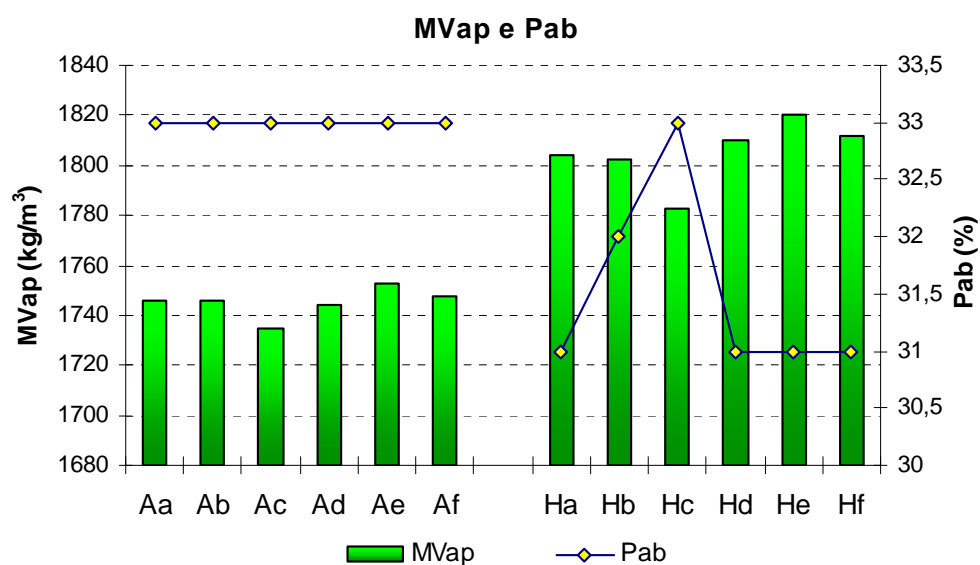


Fig. 6.15 – Compacidade das argamassas em estudo

À exceção das argamassas de cal aérea curadas com 50 % HR, todas as restantes evidenciaram maior massa volúmica aparente quando preparadas segundo a Norma ASTM C305, registando-se a diferença mais significativa no ambiente de cura mais húmido. No que diz respeito à porosidade aberta a influência do processo de mistura foi notória apenas nas argamassas de cal hidráulica sujeitas aos ambientes de cura com 65 % e 95 % HR onde, em consonância com os resultados da massa volúmica aparente, a Norma ASTM C305 produziu argamassas com porosidade mais reduzida (ver fig. 6.16).

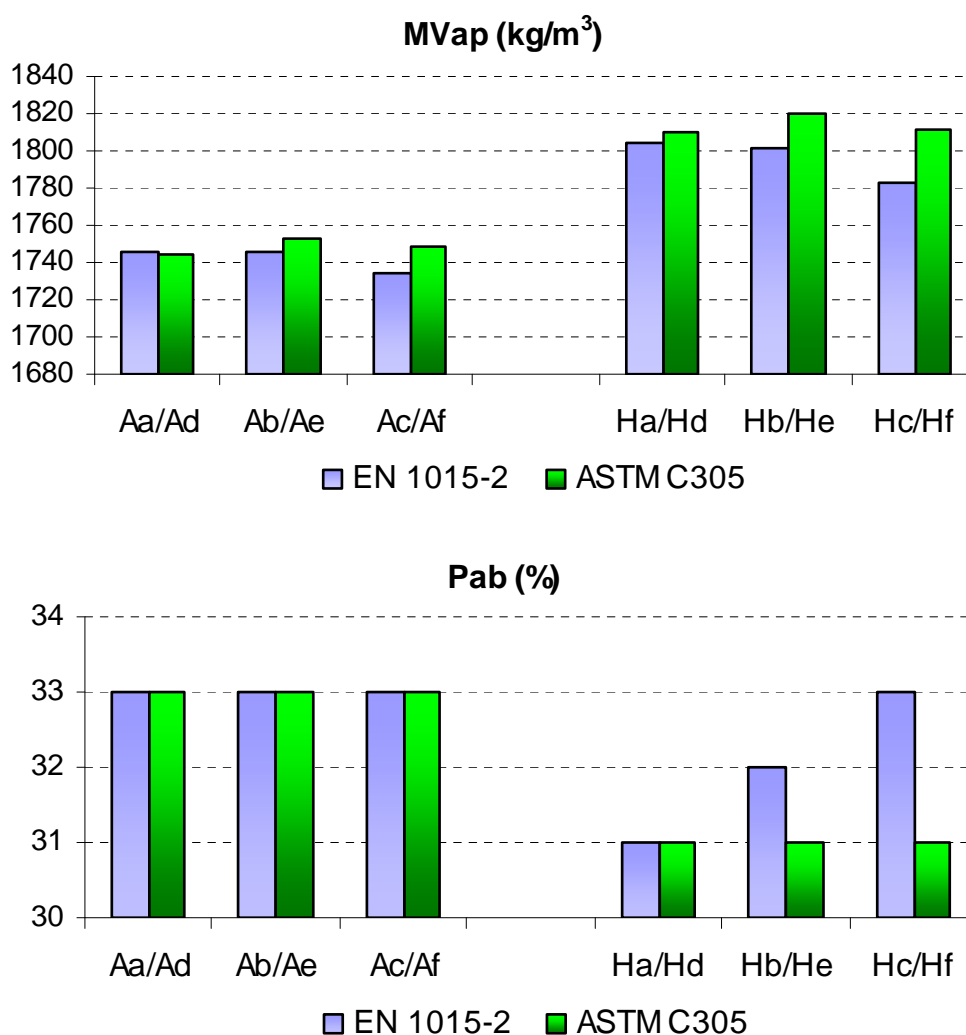


Fig. 6.16 – Influência do processo de mistura relativamente à compacidade

As condições de cura influenciaram de forma divergente a massa volúmica aparente das argamassas preparadas segundo os diferentes processos de amassadura. Nas argamassas decorrentes da Norma EN 1015-2 os valores diminuem à medida que se aumenta a humidade relativa, enquanto que para a Norma ASTM C305 os valores registam um aumento proporcional à humidade relativa até aos 65 % e uma ligeira diminuição nos 95 %. A porosidade aberta nas argamassas de cal hidráulica preparadas de acordo com a Norma EN 1015-2 aumentou linearmente com o aumento da humidade relativa. Nos restantes casos manteve-se constante perante a variação da humidade relativa dos ambientes de cura (ver fig. 6.17).

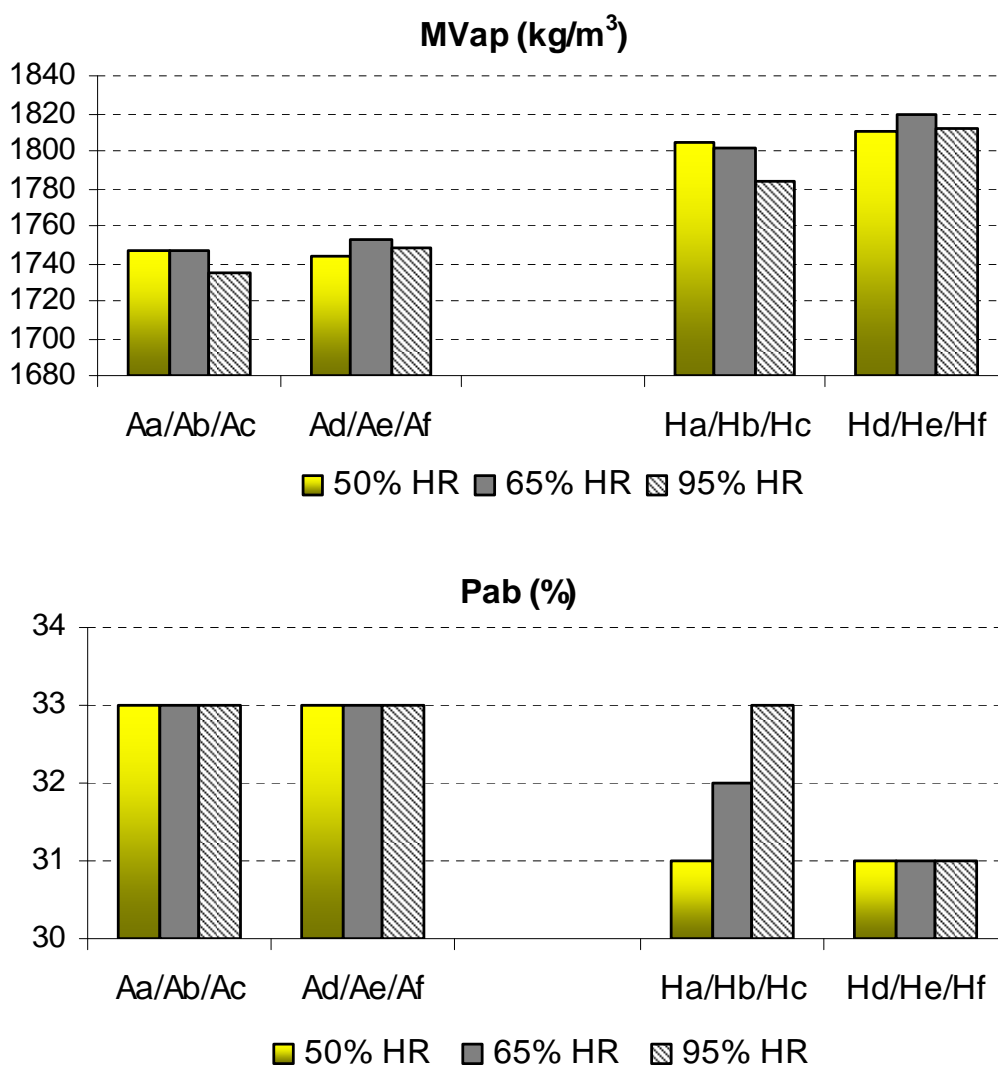


Fig. 6.17 – Influência das condições de cura relativamente à compacidade

7. DISCUSSÃO

Após examinar individualmente os resultados de cada característica optou-se por efectuar uma análise comparativa entre todas elas e verificar de que forma o processo de mistura e as condições de cura influenciam as argamassas preparadas neste estudo. Para atingir este objectivo elaborou-se o quadro 7.1, onde está sintetizado o desempenho de cada argamassa em função das variáveis em análise, o ligante escolhido (cal aérea ou cal hidráulica), o processo de mistura (EN 1015-2 ou ASTM C305) e a humidade relativa do ambiente de cura (50%, 65% e 95%).

Apesar do reduzido período de cura praticado constatou-se que as argamassas de cal aérea desenvolveram resistências mecânicas muito semelhantes às evidenciadas nas argamassas de cal hidráulica. Numa análise efectuada em termos médios verifica-se que os valores de módulo de elasticidade e resistência à tracção por flexão são mesmo superiores nas argamassas de cal aérea. Porém, relativamente à resistência à compressão as argamassas de cal hidráulica apresentam um valor 131,4% superior. A discrepância evidenciada na resistência à compressão deve-se ao facto das argamassas de cal hidráulica serem mais compactas, com valores de massa volúmica mais elevados e porosidades reduzidas. A prestação das argamassas de cal hidráulica no comportamento perante a água é pouco desejável, apresentando índices de secagem reduzidos e valores de absorção capilar mais elevados que no caso das argamassas de cal aérea, quer em termos de velocidade de absorção nos instantes iniciais ou na quantidade total de água absorvida.

A compacidade das argamassas de cal aérea foi muito semelhante em todos os lotes. Apesar da variação do processo de mistura e das condições de cura as argamassas apresentaram valores idênticos para a porosidade aberta. As diferenças evidenciadas nas resistências mecânicas e no comportamento face à água foram consequência, muito provavelmente, da dimensão do raio dos poros e das ligações estabelecidas entre eles.

Quadro 7.1 – Análise comparativa das características em estudo

Características em análise	HR do ambiente de cura (%)	Argamassas de cal aérea		Argamassas de cal hidráulica	
		Processo de mistura			
		EN 1015-2	ASTM C305	EN 1015-2	ASTM C305
Resistências mecânicas					
Módulo de Elasticidade [MPa]	50	1826	1806	1084	1322
	65	2254	2187	1109	1459
	95	1657	1820	2019	2048
	Média	1925		1507	
Resistência à tracção por flexão [MPa]	50	0,29	0,24	0,15	0,21
	65	0,34	0,28	0,17	0,28
	95	0,26	0,26	0,32	0,47
	Média	0,28		0,27	
Resistência à compressão [MPa]	50	0,38	0,30	0,58	0,63
	65	0,41	0,36	0,63	0,66
	95	0,33	0,33	0,96	1,37
	Média	0,35		0,81	
Comportamento face à água					
Valor assimpótico [kg/m²]	50	39,180	37,785	42,899	42,577
	65	39,146	38,095	41,391	42,146
	95	40,108	39,173	43,145	42,099
	Média	38,915		42,376	
Coeficiente de Capilaridade [kg/m².s ^{0,5}]	50	0,235	0,230	0,286	0,290
	65	0,293	0,268	0,298	0,298
	95	0,258	0,261	0,278	0,261
	Média	0,258		0,285	
Índice de secagem	50	0,40	0,38	0,36	0,30
	65	0,37	0,35	0,33	0,28
	95	0,41	0,38	0,27	0,33
	Média	0,38		0,31	
Compacidade					
Massa volúmica aparente [kg/m³]	50	1746	1744	1804	1810
	65	1746	1753	1802	1820
	95	1735	1748	1783	1812
	Média	1745		1805	
Porosidade aberta [%]	50	33	33	31	31
	65	33	33	32	31
	95	33	33	33	31
	Média	33		31,5	

Legenda:

- Valor mínimo para a tipologia de argamassa em análise
- Valor máximo para a tipologia de argamassa em análise
- Valor mínimo igual ao valor máximo para a tipologia de argamassa em análise

As argamassas de cal aérea preparadas segundo a Norma EN 1015-2 e curadas com 65% HR desenvolveram resistências mecânicas elevadas e quando submetidas ao ensaio de capilaridade, apesar da absorção de água se ter processado com rapidez numa fase inicial, a quantidade total de água absorvida foi reduzida. A evaporação da água existente nos seus poros efectuou-se com alguma dificuldade, visto que o índice de secagem foi reduzido em comparação com os restantes lotes de argamassa de cal aérea. As argamassas misturadas de igual forma mas curadas com 95% HR e as argamassas preparadas de acordo com a Norma ASTM C305 e curadas com 50% HR registaram as resistências mecânicas mais reduzidas no que respeita ao ligante aéreo. A semelhança evidenciada em termos mecânicos contrasta com as diferenças patenteadas no comportamento face à água. As argamassas mencionadas em primeiro lugar absorveram grande quantidade de água mas evidenciaram relativa facilidade em expulsá-la por evaporação, enquanto que nas outras argamassas em análise o desempenho foi exactamente o oposto.

No que diz respeito às argamassas de cal hidráulica, quando misturadas segundo a Norma EN 1015-2 e curadas com 50% HR apresentam resistências mecânicas reduzidas, apesar da sua elevada compacidade comparativamente com as restantes argamassas misturadas de forma análoga. As argamassas mencionadas tendem a absorver grandes quantidades de água por capilaridade mas a sua secagem é expedita, registando um índice de secagem elevado.

O processo de mistura de acordo com a Norma ASTM C305 e a cura mais húmida com 95% HR potenciam as características das argamassas com o ligante hidráulico. O resultado são argamassas compactas, com elevadas resistências mecânicas e com um desempenho surpreendentemente positivo no comportamento face à água, caracterizando-se por uma reduzida absorção capilar e por um elevado índice de secagem. Alterando apenas a mistura para o procedimento descrito na Norma EN 1015-2 as resistências mecânicas decrescem ligeiramente, o que pode ser representado como um reflexo da baixa compacidade demonstrada por estas argamassas. A elevada porosidade aberta e a consequente massa volúmica aparente reduzida traduziram-se, neste caso específico, na absorção capilar máxima e no índice de secagem mínimo relativamente às argamassas de cal hidráulica.

8. CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

8.1 Conclusões gerais

A presente investigação concluiu que as diferenças nos procedimentos dos métodos de ensaio que se destinam à preparação das argamassas influenciam determinantemente as suas características físicas e mecânicas e o seu comportamento face à água. Actualmente, as equipas de investigação que se propõem a examinar o comportamento das argamassas de substituição utilizam diferentes métodos de ensaio, o que impossibilita a comparação quantitativa entre os resultados dos diferentes estudos desenvolvidos. As próprias Normas existentes para o ensaio destas argamassas preconizam, na maioria dos casos, processos de amassadura com velocidades e tempos de mistura completamente desajustados e períodos de cura que antecedem os ensaios mecânicos demasiadamente curtos e com humidades relativas desadequadas. É notório que os métodos de ensaio estão ainda muito direccionados para as características das argamassas à base de ligantes hidráulicos, com procedimentos que visam potenciar a hidratação dos seus compostos hidráulicos e que se baseiam nas elevadas resistências mecânicas atingidas num curto espaço de tempo após a amassadura.

Neste estudo compararam-se duas Normas de ensaio relativas ao processo de mistura das argamassas, a Norma Europeia EN 1015-2:1998/A1:2006 [20] e a Norma ASTM C305 [3] elaborada nos Estados Unidos da América. O procedimento da Norma EN 1015-2 é mais direccionado para as argamassas de ligantes aéreos, pois a mistura é sempre realizada numa velocidade lenta. Porém, o período estipulado na Norma para se processar a amassadura é excessivamente curto para potenciar as características das argamassas de ligantes aéreos. Na Norma ASTM C305 a mistura é mais prolongada mas o seu procedimento é inteiramente vocacionado para argamassas à base de ligantes hidráulicos. O maior período da amassadura é realizado na velocidade rápida, o ligante é primeiramente misturado com a água antes de se adicionar o agregado e existe um período de repouso que visa a hidratação inicial dos componentes hidráulicos do ligante. Relativamente às condições de cura a comparação efectuada recaiu sobre a Norma Europeia EN 1015-11:1999/A1:2006 [27] e a Norma dos Estados Unidos da América ASTM C 109/C 109M [2]. Em ambas as Normas os períodos de cura que antecedem o ensaio mecânico são insuficientes para que as argamassas de cal aérea atinjam as resistências necessárias e na Norma ASTM C 109/C 109M a imersão dos provetes em

água impede que o processo de carbonatação se efectue, concluindo-se que este método é apenas aconselhável para argamassas de cimento Portland e nunca para argamassas cujo endurecimento se realize através de uma fase aérea.

Uma acção que poderia trazer enormes benefícios para a investigação das argamassas de cal e para as intervenções de conservação dos rebocos de edifícios antigos onde estas são aplicadas seria a formulação de um regulamento internacional que estipulasse quais os ensaios necessários para retratar as argamassas em estudo e quais os procedimentos que potenciasses as suas características. Desta forma seria possível uma adequação das Normas às especificidades dos ligantes aéreos que incorporam as argamassas de substituição e uma uniformização de técnicas de investigação que permitiria a futura comparação quantitativa entre resultados de diferentes estudos.

Após a análise detalhada dos resultados decorrentes do estudo experimental desenvolvido foi possível retirar várias ilações relativamente à influência que o ligante empregue, o procedimento praticado na amassadura e a humidade relativa imposta no ambiente de cura exercem sobre as características das argamassas para rebocos de edifícios antigos. As argamassas com esta especificidade devem possuir características que impeçam a sua própria degradação mas, acima de tudo, que preservem a integridade das alvenarias e dos valores históricos e culturais que elas encerram.

Independentemente do processo de mistura e das condições de cura, verificou-se que as argamassas de cal aérea desenvolveram resistências mecânicas muito semelhantes às obtidas para as argamassas de cal hidráulica, inclusivamente com valores superiores no que diz respeito ao módulo de elasticidade e à resistência à tracção por flexão. Por sua vez, as argamassas de cal hidráulica revelaram-se mais compactas, mais resistentes a esforços de compressão e com pior comportamento face à água, absorvendo grandes quantidades de água e denotando alguma dificuldade na sua expulsão por evaporação.

A influência do processo de mistura foi evidente logo após a amassadura no ensaio de determinação da consistência, visto que as argamassas preparadas pela Norma ASTM C305 evidenciaram maior espalhamento para a mesma relação água/ligante.

Constatou-se que as argamassas de cal hidráulica desenvolvem maiores resistências mecânicas quando são preparadas pela norma ASTM C305. A evolução das propriedades mecânicas da argamassa de cal hidráulica quando preparada através desta norma poderá ter relação directa com o período inicial de mistura praticado somente entre o ligante e a água e o intervalo de repouso imposto na fase final do procedimento. Estas duas particularidades da norma favorecem a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio presentes no ligante, que posteriormente irão gerar compostos hidratados que intervêm directamente nas resistências mecânicas da argamassa [56]. Relativamente às argamassas de cal aérea regista-se o oposto, as suas resistências mecânicas são mais elevadas quando preparadas segundo a norma EN 1015-2. Tal poderá derivar do facto desta norma preconizar uma mistura realizada sempre em velocidade lenta [14]. Porém, para humidades relativas de 95% os valores obtidos são exactamente iguais para as duas normas, tanto na resistência à tracção por flexão como na resistência à compressão.

Em termos de absorção capilar, as argamassas na sua generalidade absorvem maior quantidade total de água quando a sua mistura segue a Norma EN 1015-2. Na velocidade com que essa absorção se processa nos instantes iniciais observa-se a mesma tendência mas verifica-se que para as argamassas com menores resistências mecânicas, submetidas à cura mais húmida no caso das argamassas de cal aérea e à cura mais seca no caso das argamassas de cal hidráulica, o coeficiente de capilaridade é superior na Norma ASTM C305. Apesar da Norma EN 1015-2 apresentar pior comportamento na absorção capilar, a secagem das argamassas é bastante mais expedita que no caso da Norma ASTM C305. A excepção a esta regra verifica-se nas argamassas de cal hidráulica com maiores resistências mecânicas, resultantes da cura mais húmida. O comportamento face à água das argamassas revelou-se coerente com os valores de compacidade. Apesar da porosidade aberta ser bastante semelhante em todas as argamassas, constatou-se através dos valores de massa volúmica que a Norma ASTM C305 aumentava a compacidade dos provetes, daí a sua baixa absorção capilar e índices de secagem reduzidos.

No que respeita à influência das condições de cura verifica-se que as resistências mecânicas atingidas pelas argamassas de cal hidráulica são directamente proporcionais à humidade relativa do respectivo ambiente de cura, enquanto que nas argamassas de cal aérea essa proporcionalidade só se verifica até humidades relativas de 65% (valor mais

elevado de resistência mecânica). A partir deste valor a proporcionalidade é inversa, observando-se uma diminuição dos valores para as humidades relativas de 95%.

Em ambas as argamassas o teor de humidade favorece o aumento das suas resistências mecânicas. No caso das argamassas de cal aérea a existência de humidade é essencial para que se processe a dissolução do dióxido de carbono e do hidróxido de cálcio, sendo que a interação dos iões que daí resultam irá proporcionar o desenvolvimento dos cristais de carbonato de cálcio que conferem as resistências mecânicas pretendidas [15]. Porém, em ambientes muito húmidos, como no caso de curas com 95% de humidade relativa, é possível que se depositem gotículas de água nas superfícies expostas das argamassas, impedindo assim a difusão do dióxido de carbono e dificultando o processo de carbonatação [41]. Nas argamassas de cal hidráulica a humidade é crucial no seu endurecimento, tanto na fase aérea, pelos motivos já mencionados, como na fase hidráulica para possibilitar a hidratação dos seus componentes hidráulicos.

As argamassas de cal aérea absorveram maior quantidade de água por capilaridade quando submetidas à cura mais húmida, enquanto que nas argamassas de cal hidráulica essa quantidade revelou-se inversamente proporcional à humidade relativa na Norma ASTM C305 e na Norma EN 1015-2 obtiveram-se absorções capilares mais elevadas para os ambientes mais seco e mais húmido. A tendência evidenciada no coeficiente de capilaridade foi transversal a todas as argamassas, aumentou até à humidade relativa de 65% e decresceu nos 95%. A secagem das argamassas de cal aérea por evaporação revelou-se mais difícil para o ambiente de cura com 65% HR, ou seja, para os provetes com resistência mecânica mais elevada. Nas argamassas de cal hidráulica misturadas pela Norma EN 1015-2 o índice de secagem diminuiu com o aumento da humidade relativa da cura e, consequentemente, com o aumento das resistências mecânicas. Alterando o processo de mistura para a Norma ASTM C305 a diminuição do índice de secagem só se verifica até aos 65% HR, obtendo-se o valor mais elevado nos 95% HR para os provetes mais resistentes. O comportamento satisfatório na secagem das argamassas de cal hidráulica decorrentes do ambiente mais húmido e da mistura segundo a Norma ASTM C305 explica-se pela diminuição da massa volúmica perante estas condições. Por sua vez, a compacidade das argamassas de cal aérea revelou-se em consonância com as resistências mecânicas e com o comportamento face à água. A cura de 65% HR obteve as argamassas mais

compactas e resistentes e, logo, com baixa absorção capilar e índice de secagem reduzido.

Ao analisar a globalidade dos resultados e a influência que as variáveis estudadas têm sobre as diferentes características, conclui-se que não é um exercício simples formular uma argamassa de substituição que satisfaça por completo os requisitos necessários para a protecção eficaz das alvenarias de edifícios antigos. Apesar disso, o processo de mistura segundo a Norma EN 1015-2 revelou-se mais adequado para cumprir essas funções que a Norma ASTM C305. As argamassas preparadas pela Norma Europeia evidenciaram menor compacidade e, apesar de absorverem maior quantidade de água por capilaridade, a expulsão dessa humidade por evaporação processou-se com maior facilidade. A reduzida compacidade traduz-se em argamassas com menores resistências mecânicas que induzem menores tensões ao suporte e a facilidade de secagem evita que a água existente nos poros possa originar esforços mecânicos internos decorrentes dos ciclos de gelo-degelo ou de cristalização-dissolução dos sais em solução.

8.2 Sugestão de trabalhos futuros

Em termos de trabalhos a desenvolver é pertinente salientar alguns parâmetros da presente dissertação que carecem de uma investigação futura:

- Realizar amassaduras com igual traço volumétrico para ambas as argamassas, à base de cal aérea e à base de cal hidráulica, de forma a avaliar se o módulo de elasticidade e a resistência à tracção por flexão se mantêm superiores no caso do ligante aéreo;
- Além da realização das misturas segundo os procedimentos descritos nas Normas EN 1015-2 e ASTM C305, efectuar mais uma amassadura realizada sempre na velocidade lenta do misturador, tal como preconizado na Norma Europeia mas mais prolongada e com um período de mistura inicial entre a água e o ligante, antes da adição do agregado;
- Colocar os provetes nos respectivos ambientes de cura com 50%, 65% e 95% de humidade relativa logo após as amassaduras, contrariamente à permanência da totalidade do lote de ensaio durante os 7 dias iniciais a 65% de humidade relativa.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] AGOSTINHO, C. S. A. – **Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea**. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2008. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM) – **Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)**. West Conshohocken, ASTM, 2002. ASTM C 109/C 109M.
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM) – **Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency**. West Conshohocken, ASTM, 1999. ASTM C 305.
- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM) – **Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure)**. West Conshohocken, ASTM, 2002. ASTM C 349.
- [5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM) – **Standard specification for moist cabinets, moist rooms, and water storage tanks used in the testing of hydraulic cements and concretes**. West Conshohocken, ASTM, 1998. ASTM C 511.
- [6] BOYTON, Robert S. – **Chemistry and technology of lime and limestone**. 2ª Edição. New York, John Wiley & Sons, 1980.
- [7] CHAROLA, A. E.; HENRIQUES, F. A. – **Hydraulicity in lime mortars revisited**. Paisley, Scotland, RILEM Publications, 1999. RILEM TC-167COM International Workshop, University of Paisley, May 1999.
- [8] CHAROLA, A. E.; HENRIQUES, F. A. – **Lime mortars: some considerations on testing standardization**. Atlanta, ASTM, 1998. ASTM STP 1355, ASTM International Symposium on the Use of and Need for Preservation Standards in Architectural Conservation.
- [9] CÓIAS, V. – **Qualificação para a reabilitação: a diferença entre sucesso e fracasso**. In “2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção”, Lisboa, 22 e 23 de Novembro de 2007.
- [10] COUTINHO, A. de Sousa – **Fabrico e propriedades do betão: volume I**. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997.
- [11] COUTINHO, J. de Sousa – **Materiais de Construção 2**. Porto, FEUP, 2006.
- [12] COUTINHO, J. de Sousa – **Agregados para argamassas e betões**. Porto, FEUP, 1999.

- [13] COUTO, A. Bastos; COUTO, J. Pedro – **Especificidades e Exigências das Argamassas na Reabilitação de Edifícios Antigos**. Minho, Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassa de Construção (APFAC), 2007.
- [14] École D'Avignon – **Techniques et pratique da la chaux**. 2ª Edição. Paris, Eyrolles, 2003.
- [15] ELERT, Kerstin *et al* – **Lime mortars for the conservation of historic buildings**. Studies in Conservation, vol. 47, p. 62-75, 2002.
- [16] EL-TURKI, A.; BALL, R. J.; ALLEN, J. C. – **The influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic lime**. Cement and Concrete Research, 37, p. 1233-1240, 2007.
- [17] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Specification for mortar for masonry – Part 1: Rendering and plastering mortar**. Brussels, CEN, 2003. EN 998-1.
- [18] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Specification for mortar for masonry – Part 2: Masonry mortar**. Brussels, CEN, 2003. EN 998-2.
- [19] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 1: Determination of particle size distribution (by sieve analysis)**. Brussels, CEN, 2006. EN 1015-1.
- [20] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars**. Brussels, CEN, 2006. EN 1015-2.
- [21] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)**. Brussels, CEN, 2006. EN 1015-3.
- [22] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 4: Determination of consistence of fresh mortar (by plunger penetration)**. Brussels, CEN, 1998. EN 1015-4.
- [23] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar**. Brussels, CEN, 2006. EN 1015-6.
- [24] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 7: Determination of air content of fresh mortar**. Brussels, CEN, 1998. EN 1015-7.
- [25] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 9: Determination of workable life and correction time of fresh mortar**. Brussels, CEN, 2006. EN 1015-9.

- [26] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar**. Brussels, CEN, 2006. EN 1015-10.
- [27] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar**. Brussels, CEN, 2006. EN 1015-11.
- [28] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates**. Brussels, CEN, 2000. EN 1015-12.
- [29] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar – Part 14: Determination of durability of hardened masonry mortars (with cement comprising greater than 50% of the total binder mass)**. Brussels, CEN, 1999. prEN 1015-14.
- [30] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 17: Determination of water-soluble chloride content of fresh mortars**. Brussels, CEN, 2004. EN 1015-17.
- [31] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar**. Brussels, CEN, 2002. EN 1015-18.
- [32] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 19: Determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars**. Brussels, CEN, 2004. EN 1015-19.
- [33] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – **Methods of test for mortar for masonry – Part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates**. Brussels, CEN, 2002. EN 1015-21.
- [34] FARIA, P.; HENRIQUES, F. M. A.; RATO, V. M. – **Argamassas Correntes: Influência do Tipo de Ligante e do Agregado**. In “2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção”, Lisboa, 22 e 23 de Novembro de 2007.
- [35] FEILDEN, B. – **Conservation of Historic Buildings**. London, Butterworth, 1982.
- [36] GILLIS, T.; QUACH, H.; THORNTON, J. – **Lime Mortar**. Minnesota, St. Olaf College, 2005.
- [37] GUERREIRO, C. A. – **Estudo e caracterização de argamassas de cal aérea, medianamente hidráulica e de ligantes mistos para rebocos de edifícios antigos**. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2007. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Recuperação e Conservação do Património Construído.

- [38] HENRIQUES, F. M. A.; RATO, V. M.- **Avaliação do comportamento de argamassas face a fenómenos de higroscopicidade**. 3º ENCORE - Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Lisboa, LNEC, Maio de 2003, p. 405-412.
- [39] HENRIQUES, F. M. A. *et al* – **Formulating Mortars and Renders for Historic Buildings: A discussion Paper**. International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, vol. 10, nº 6, 2004, p. 583-592.
- [40] HENRIQUES, F. M. A. – **Replacement mortars in conservation: an overview**. 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, Junho 2004. Daniel Kwiatkowski & Runo Lofvendahl, eds., p.973-983.
- [41] HENRIQUES, Fernando M. A.; CHAROLA, A. E. – **Comparative study of standard test procedures for mortars**. Berlin, Moller Druck, 1996. In “ 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone”, Josef Riederer (ed.), p.1521-1528.
- [42] HENRIQUES, F. M. A. – **A Conservação do Património Histórico Edificado, Memória nº 775**. Lisboa, LNEC, 1991.
- [43] HENRIQUES, F. M. A. – **Património construído: passado e futuro**. In “Jornal O Público”.
- [44] INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE (IPQ) – **Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas**. Caparica, IPQ, 2006. NP EN 196-1.
- [45] JOKILEHTO, J. – **Conservation Principles and Their Theoretical Background**. Durability of Building Materials, vol.5, p. 267-277, 1988.
- [46] LANAS, J. *et al* – **Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars**. CEMENT and CONCRETE RESEARCH, 34, p. 2191-2201, 2004.
- [47] LANAS, J.; ALVAREZ, J. I. – **Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior**. CEMENT and CONCRETE RESEARCH, 33, p. 1867-1876, 2003.
- [48] LAWRENCE, R. M. H. *et al* – **Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars**. CEMENT and CONCRETE RESEARCH, 37, p. 1059-1069, 2007.
- [49] LAWRENCE, R. M. H. *et al* – **Determination of carbonation profiles in non-hydraulic lime mortars using thermogravimetric analysis**. Thermochemica Acta, 444, p. 179-189, 2006.
- [50] LAWRENCE, R. M. H. – **A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars**. Bath, England, University of Bath, 2006. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy.

- [51] MARGALHA, M. G.; VEIGA, M. do Rosário; BRITO, J. – **Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea**. In “2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção”, Lisboa, 22 e 23 de Novembro de 2007.
- [52] MARTÍNEZ, M. C. I.; CARRO, G. A. – **Ancient building requirements and the evaluation of different lime-cement mortars compositions**. In “2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção”, Lisboa, 22 e 23 de Novembro de 2007.
- [53] MARTINS, J. G.; ASSUNÇÃO, J. S. – **Materiais de Construção – Argamassas e Rebocos**. Porto, Universidade Fernando Pessoa (UFP), 2004.
- [54] MASCARENHAS, Jorge – **Sistemas de Construção: descrição ilustrada e detalhada de processos construtivos utilizados correntemente em Portugal: vol. II: paredes: paredes exteriores (1ª parte)**. 5ª Edição. Lisboa, Livros Horizonte, 2007.
- [55] MENDONÇA, B. de Viveiros – **Estudo do Desempenho das Argamassas Hidráulicas – Influência do Ligante**. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2007. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
- [56] PALOMO, A. *et al* – **Historic Mortars: Characterization and Durability. New Tendencies for Research**. Madrid, Eduardo Torroja Institute (CSIC).
- [57] PAVIA, S.; TREACY, E. – **A comparative study of the durability and behaviour of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars**. Materials and Structures, vol. 39, nº3, p. 391-398, 2006.
- [58] RATO, Vasco M. – **Conservação do património histórico edificado – Princípios de intervenção**. Lisboa, IST, 2002. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção.
- [59] RIBEIRO, L. C.; LOPES, R. – **As argamassas na Antiguidade Greco-Romana: usos, definições e traduções**. In “2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção”, Lisboa, 22 e 23 de Novembro de 2007.
- [60] RODRIGUES, P. F.; HENRIQUES, F. M. A. – **Avaliação comparativa de cais aéreas correntes**. 3º ENCORE – Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Lisboa, LNEC, Maio 2003, p. 503-510.
- [61] RODRIGUES, P. F.; HENRIQUES, F. M. A. – **Current mortars in conservation: an overview**. Karlsruhe, Alemanha, University of Karlsruhe, 2003. In “6th International Conference on Materials Science and Restoration MSR VI”.
- [62] RODRIGUES, P. F.; HENRIQUES, F. M. A.; RATO, V. M. – **Análise Comparativa de Argamassas Pré-doseadas para Aplicação em Rebocos de Edifícios Antigos**. In “1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção”, Lisboa, 2005.

- [63] RODRIGUES, P. F. - **Estudo comparativo de diferentes argamassas tradicionais de cal aérea e areia**. Porto, FEUP, 2003. PATORREB 2003 – 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de edifícios.
- [64] SÁ, A. S. – **Argamassa de cal aérea hidratada com incorporação de gordura e sua utilização em rebocos**. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2002. Monografia apresentada no âmbito da cadeira de Tecnologias da Construção.
- [65] SEQUEIRA, A. C.; FRADE, D.; GONÇALVES, P – **Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação**. In “2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção”, Lisboa, 22 e 23 de Novembro de 2007.
- [66] SILVA, L. *et al* – **Avaliação da Reprodutibilidade e Repetibilidade de Resultados Relativos a Ensaios Referentes à Norma EN 1015 para Argamassas de Reboco**. In “2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção”, Lisboa, 22 e 23 de Novembro de 2007.
- [67] SOUSA, Vítor; PEREIRA, F. D.; BRITO, J. – **Rebocos Tradicionais: Principais Causas de Degradação**. Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2005.
- [68] STEFANIDOU, M.; PAPAYIANNI, I. – **The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars**. Cement & Concrete Composites, 27, p. 914-919, 2005.
- [69] UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA (UNL) / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL (DEC) – **Ficha de Ensaio – Pedras Naturais e Artificiais. Determinação da massa volúmica**. Caparica, FCT/UNL, 1996. Fe 01.
- [70] UNL / DEC – **Ficha de Ensaio – Pedras Naturais e Artificiais. Determinação da porosidade aberta**. Caparica, FCT/UNL, 1996. Fe 02.
- [71] UNL / DEC – **Ficha de Ensaio – Pedras Naturais e Artificiais. Determinação da absorção de água por capilaridade**. Caparica, FCT/UNL, 1999. Fe 06.
- [72] UNL / DEC – **Ficha de Ensaio – Pedras Naturais e Artificiais. Determinação do índice de secagem**. Caparica, FCT/UNL, 1996. Fe 07.
- [73] UNL / DEC – **Ficha de Ensaio – Pedras Naturais e Artificiais. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico**. Caparica, FCT/UNL, 1996. Fe 08.
- [74] UNL / DEC – **Ficha de Ensaio – Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade**. Caparica, FCT/UNL, 1996. Fe 15.
- [75] UNL / DEC – **Ficha de Ensaio – Análise de argamassas. Preparação dos provetes**. Caparica, FCT/UNL, 1996. Fe 19.
- [76] UNL / DEC – **Ficha de Ensaio – Análise de argamassas. Determinação da consistência**. Caparica, FCT/UNL, 1998. Fe 25.

- [77] UNL / DEC – **Ficha de Ensaio – Análise de argamassas. Determinação da resistência à flexão e compressão.** Caparica, FCT/UNL, 1999. Fe 27.
- [78] WINNEFELD, Frank; BÖTTGER, K. Georg – **How clayey fines in aggregates influence the properties of lime mortars.** Materials and Structures, vol. 39, nº4, p. 433-443, 2006.

REFERÊNCIAS DE CONSULTA ELECTRÓNICA

- [79] Site da **Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas de Construção**. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa 2007. <http://www.apfac.pt/congresso2007/> (10/11/2008)
- [80] Site da **IBSTOCK – Building Sustainability**. “Use of traditional lime mortars in modern brickwork”. <http://www.ibstock.com/pdfs/technical-support/traditional-lime-mortar.pdf> (28/01/2009)
- [81] Site da **Bricks & Brass**. <http://www.bricksandbrass.co.uk/diymats/lime/lime.htm> (28/01/2009)
- [82] Site **The Building Limes Forum** – About Lime – Why use Lime? <http://www.buildinglimesforum.org.uk/whyuselime.htm> (28/01/2009)
- [83] Site do **Dicionário Sensagent**. <http://dictionnaire.sensagent.com> (15/02/2009)
- [84] Site da **Eurotechchimney** – Introduction to Lime Mortars. www.eurotechchimney.com (20/12/2008)
- [85] Site **The Getty** – Conservation Institute – Publications and Videos – Free PDF publications. <http://www.getty.edu/> (15/01/2009)
- [86] Site do **Dicionário Priberam da Língua Portuguesa**. <http://www.priberam.pt/dlpo/dlpo.aspx> (15/02/2009)